Южный федеральный университет

НКТБ «ПЬЕЗОПРИБОР» ЮФУ
Факультет высоких технологий ЮФУ

Сборник трудов

VIII Всероссийской научно-технической конференции

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

10–15 сентября 2012 г.
г. Ростов-на-Дону

УДК 53.082.73
ББК 31.261.3
С 23

23 Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения : сборник трудов VIII Всероссийской научно- технической конференции, г. Ростов-на-Дону, 10–15 сентября, 2012. – Издательство Южного федерального университета, 2012. – 116 с.
ISBN 978-5-9275-0984-3

Отпечатано с оригиналов статей, в авторской редакции.

ISBN 978-5-9275-0984-3©НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель	**Панич Анатолий Евгеньевич** – директор-главный конструктор НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, декан факультета высоких технологий ЮФУ, д.т.н, профессор, академик РИА
Сопредседатели	**Айдаркин Евгений Константинович** – Первый проректор по научной и инновационной деятельности Южного федерального университета, к.б.н., профессор
Члены оргкомитета	**Доля Владимир Константинович** – заместитель директора по научной работе и инновациям НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, к.т.н
	Богуш Михаил Валерьевич - заместитель директора НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, д.т.н.
	Нестеров Алексей Анатольевич – профессор кафедры «Общей и неорганической химии» химического факультета Южного федерального университета, д.т.н., профессор
	Пьявченко Олег Николаевич – заведующий кафедрой микропроцессорной техники Таганрогского технологического института ЮФУ, д.т.н., профессор
	Земляков Виктор Леонидович – заместитель декана по учебной работе факультета высоких технологий ЮФУ, д.т.н., доцент

СОДЕРЖАНИЕ

ПЬЕЗО- И НАНОМАТЕРИАЛЫ СТРУКТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Зависимость электрофизических свойств керамических материалов на основе пьезофаз системы ЦТС-ЦННС от способов синтеза и характеристик частиц порошков исходной шихты *Нестеров А.А., Панич А.А., Свирская С.Н., Нагаенко А.В*……. 6

Наноразмерные прекурсоры для «химической сборки» слоистых фаз типа титаната висмута *Нестеров А.А., Панич А.Е., Панич А.А.* …….. 8

Дегидратация ксерогеля целевой фазы как способ формирования пьезокомпозитов цтс-воздух типа 3 – 3 и 3 – 0 *Нестеров А.А., Панич А.А., Свирская С.Н., Пахомов А.С.* …… 10

Синтез фаз кислородно-октаэдрического типа, основанных на различных вариантах метода химического и структурного подобия *Нестеров А.А., Панич А.Е., Панич А.А., Доля В.К., Карюков Е.В.* …….. 11

Фазы систем Bi0,5Na0,5TiO3 – PbTiO3 и Bi0,5K0,5TiO3 – PbTiO3, синтезированные в рамках различных методов *Нестеров А.А., Панич А.Е., Панич А.А., Свирская С.Н., Васильев И.В.* …… 13

Методы управления процессами формироания микростуктуры керамики, основанные на изменении скоростей рекристаллизации и роста зёрен пьезокерамики на основе фаз системы ЦТС *Нестеров А.А., Панич А.А., Доля В.К., Криков В.В., Васильев И. В.* ……. 15

Особенности процессов формирования керамических каркасов из нано- и ультрадисперных порошков пьезофаз системы ЦТС *Нестеров А.А., Панич А.А., Свирская С.Н., Мараховский М.А.* ……. 17

Влияние условий синтеза шихты на электрофизические параметры пьезокерамики ЦТБС-3 Нестеров А.А., Карюков Е.В., Малыхин А.Ю., Скрылев А.В., Бородаев А.В. …… 19

Роль доменных и ориентационных эффектов в формировании гидростатического пьезоэлектрического отклика новых 2–2-композитов на основе кристалла PMN–0,28PT *Тополов В.Ю., Бауэн К.Р., Криворучко А.В.* …….. 21

Пьезоэлектрическая анизотропия и эффективные параметры пористых композитов на основе сегнетопьезокерамики ЦТС-19 *Воронцов А.А., Филиппов С.Е., Тополов В.Ю.* …… 24

Возможность комплексного исследования температурной зависимости электрофизических параметров пьезокерамических материалов *Панич А.А., Карюков Е.В,.Свирская С.Н, Скрылев А.В.,Малыхин А.Ю.* …… 27

Исследование свойств пьезоматериала с пониженной температурой спекания *Мараховский В.А., Мараховский М.А., Свирская С.Н.* …… 30

Особенности получения пьезоэлектрической керамики с применением высокоэнергетического помола *Еремкин В.В., Нагаенко А.В., Панич А.А., Смотраков В.Г.* 33

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ, МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Проектирование высокочастотного пьезоэлектрического элемента ультразвуковой антенной решетки для задач неразрушающего контроля *Галий С.Н., Доля В.К.* ……. 35

Исследование диаграммы направленности пьезоэлектрических акустических преобразователей для ультразвуковых расходомеров газа *Богуш М.В., Пикалев Э.М., Толмачев С.А.* …….. 38

Датчики давления для автономных измерительных систем *Шатуновский О.В., Шатуновский М.О.* …… 41

Исследование путей расширения диапазона вязкости вибрационного плотномера *Зацерклянный О.В.* …….. 44

Промышленные ультразвуковые расходомеры газа *Богуш О.М.* ……. 47

Исследование механических напряжений и электрических полей в пьезоэлектрическом преобразователе акселерометра методом конечных элементов *Янчич Вл. В., Митько В.Н.* 50
Пьезоэлектрические двухдиапазонные акселерометры *Янчич В.В., Джения Д.В., Янчич Вл.В.* …… 54
Монолитный пьезоэлектрический преобразователь усилия с функцией калибровки *Янчич Вл.В.* …… 59
Исследование пьезоэлектрического микро-вентилятора (MB) MURATA MZB1001T02 *Алексюнин Е. С.* …… 62
Определение пьезомодуля на образцах пьезокерамических элементов с невысокой добротностью *Земляков В.Л., Урокова Ю.* …… 65
Компьютерное моделирование пьезодвигателей для стабилизации оптической оси лазера *Соленова И.О.* …… 68
Применение методов оптимизации для определения параметров многоконтурной эквивалентной схемы пьезоэлемента *Толмачев С.А.* …… 71
Программное обеспечение для обработки данных экспериментального исследования пьезокерамических элементов *Пешиков С.В.* …… 73
Применение методов оптимизации для определения параметров одноконтурной эквивалентной схемы пьезоэлемента *Нерубальский В.Ю.* …… 76
Оценка погрешности определения добротности пьезорезонаторов по измерениям активной составляющей проводимости *Ключников С.Н.* …… 79
Исследования методов определения параметров пьезоэлементов программно-аппаратным комплексом на основе LabView *Ключников С.Н., Бодрикова Т.А.* …… 82
Измерение чувствительности приемников звука при высокой температуре *Шаблицкий А.Ю., Доля В.К.* …… 85

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОЕКТАМ

Метод клавиатурного почерка для идентификации пользователей при удалённом доступе к наукоемкому оборудованию *Савченко Д.С., Горчакова А.В.* …… 89
Поисковая система для научно-образовательного комплекса с удаленным доступом к наукоемким приборам *Колпаков Е.А.* …… 90
Интерактивные мультимедийные модели наукоемких приборов как инструмент обучения пользователей *Михайличенко В.Н.* …… 92
Модели и алгоритмы принятия решений в формировании профессиональных компетенций специалиста *Зверяко А.Е.* …… 93
Модели, алгоритмы и программы принятия решений в управлении высокотехнологичным плохо структурированным проектом *Сомов А. С.* …… 96
Форсайт-анализ кадровой обеспеченности развития нанотехнологий на основе имитационной модели *Корохова Е. В., Чусова Ю.С., Петракова А.В.* …… 98
Модель вытягивающего производства для наукоемкого предприятия *Корохова Е.В., Корохов В.В., Бородулина Е.Н.* …… 101
Модели принятия решений и алгоритмы защиты территории от града на основе ТРИЗ *Корохова Е.В., Шабаршина И.С., Дурановская А.В., Тухикян К.В.* …… 105
Принципы управления высокотехнологичным инновационным проектом *Петраков В.А., Граецкая О.В., Сомов А.С., Петракова А.В., Голосов А. К.* …… 109
Смешанный алгоритм решения задачи комплектования химических источников тока *Корохова Е.В., Бородулина Е.Н., Гудкова С.А.* …… 112

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОФАЗ СИСТЕМЫ ЦТС-ЦННС ОТ СПОСОБОВ СИНТЕЗА И ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ ПОРОШКОВ ИСХОДНОЙ ШИХТЫ

А.А. Нестеров, А.А. Панич, Свирская С.Н., А.В.Нагаенко

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Пьезокерамика на основе фаз системы $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ - $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (ЦТС-ЦННС) представляет практический интерес в связи с тем, что изделия на её основе характеризуются высокими значениями, как диэлектрических, так и пьезоэлектрических параметров. Однако эти материалы относительно редко применяются при изготовлении пьезопреобразователей, что объясняется более низкой, по сравнению с другими промышленными пьезокерамическими материалами, воспроизводимостью их электрофизических свойств (ЭФС). Причинами этого являются: а) сложный последовательно–параллельный механизм формирования пьезофаз данной системы в процессе их синтеза; б) химическая, структурная и гранулометрическая неоднородность частиц шихты; в) неконтролируемая скорость протекания в системах процессов первичной и вторичной рекристаллизации. Первая группа факторов способствует наноструктурным изменениям фаз (состав, дефектность, строение элементарных ячеек). Тогда как вторая и третья - оказывают влияние на мезо- и микроструктуру керамического каркаса (размер, форма и ориентация доменов и зёрен, тип, характер и структура межзёренных границ, концентрация, размер и форма пор, тип связности составляющих систему микрообъектов и т.д.). Указанные уровни структурирования керамики предопределяют, как ЭФС образцов, так и их механические характеристики, а возможные их изменения связаны с технологическими параметрами двух последовательных процессов: синтезом порошков пьезофаз и спеканием прессзаготовок, изготовленных на их основе. В связи с этим целью данной работы является установление влияния способов формирования порошков пьезофаз и условий спекания прессзаготовок на ЭФП керамических пьезоматериалов на основе одной из фаз системы ЦТС-ЦННС, принадлежащей морфотропной области.

Синтез порошков фаз указанной системы проводился двумя способами:

1) МТФР с использованием в качестве прекурсоров двух партий порошков оксидов Pb(II), Ti(IV), Zr(IV), Zn(II), Ni(II), Nb(V), имевших различный гранулометрический состав: а) $d_1 \geq 1{,}2$ мкм и б) $0{,}32 \leq d_2 \leq 0{,}46$ мкм (ступенчатый обжиг прессзаготовок при температурах от 600 до 1000°С с шагом 100 – 150°С, время изотермических стадий 3-6 часов). Вторая партия исходной смеси порошков была получена из первой с помощью мельницы планетарного типа Pulverisette 6 (4 часа помола).

2) Методом «химической сборки». В качестве прекурсоров в рамках данного метода использовались предварительно синтезированные оловые формы гидроксидов титана (IV), циркония (IV) и ниобия (V), имеющие сходное строение с подрешёткой (B) целевой фазы. Эти матрицы заполнялись катионами Pb^{2+}, Zn^{2+} и Ni^{2+} в процессе их взаимодействия с оксидами или гидроксидами указанных элементов. Для этого к гелю состава $Nb_xZr_yTi_{1-x-y}O_{2+0,15x}{\bullet}nH_2O$ добавлялась смесь порошков оксидов или гелей гидроксидов Pb(II), Zn(II) и Ni(II) и полученная суспензия в течение часа подвергалась механическому воздействию. Образовавшийся аморфный продукт реакции кристаллизовался при различных температурах. Последний процесс контролировался методами ДТА и ТГА.Образцы, прошедшие обжиг, исследовались методом РФА и РСА (параметры элементарных ячеек, размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) D и микродеформации ($\Delta d/d$)). Размер частиц порошков шихты контролировался методами силовой зондовой и растровой электронной микроскопии.

По данным РФА в исходной шихте, не зависимо от способа её формирования, на первом этапе, при температурах > 600°С образуется смесь фаз со структурой перовскита и пирохлора. Исчезновение фазы со структурой пирохлора в образцах, полученных методом 2, наблюдается в процессе подъёма их температуры до 700 - 750°С, а для образцов полученных методом 1(б) подобный переход обнаружен при температурах ≥ 850°С (время изотермической выдержки 5 часов), а шихта, синтезированная методом 1(а) остаётся двухфазной даже при температуре синтеза 950°С (обжиг до 6 часов).

Прессзаготовки спекались в засыпке при температурах 1050, 1100, 1125, 1150, 1175, 1200, 1225, 1250, 1275ºС (время обжига 2 часа). Установлено, что с ростом химической активности шихты (методы 1а → 1б → 2), оптимальная температура спекания, изготовленных из неё образцов, снижается на 75 - 125°С. Максимально достигаемая плотность керамики также зависит от способа получения шихты: способ (1а) - 7,4 г/см^3 (способ (1а) - 92,5%, способ (1б) - 7,8 г/см^3 -97,5% и методом (2) - 7,72 г/см^3 - 96,5% от теоретической). Средний размер зёрен спечённой керамики, изготовленной их шихты, синтезированной по методу (1а), составляет 2500 - 3500 нм, по методу (1б) 1000 - 1500 нм и по методу (2) 600 ÷ 900 нм (для образцов с максимальной плотностью). Снижение температур синтеза исходных фаз (способ 2) и спекания керамики способствовало уменьшению числа неравновесных дефектов в конечных изделиях, что, наряду с однородностью гранулометрического состава шихты и уменьшением среднего размера частиц порошков пьезофаз, подавляет процесс вторичной рекристаллизации керамики. Это, в свою очередь, позволяет получать керамику с размером зерна, сравнимым с размерами отдельных доменов.

Образцы для исследования ЭФП (диаметр 10 мм, высота 1 мм) были изготовлены по стандартной технологии из шихты прошедшей предварительный обжиг при температурах от 700 до 950˚С. Полученные результаты свидетельствуют, что использование активных прекурсоров на этапе синтеза сегнетофаз, позволяет значительно повысить значения $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$, пьезомодулей, коэффициентов электромеханической связи и плотности керамических образцов, по сравнению с аналогичными материалами, изготовленными по традиционной технологии, основанной на МТФР. Таким образом, на основе фазы фиксированного состава, варьируя параметры её синтеза, можно получать материалы с различным сочетанием ЭФП (табл.1).

Таблица 1 - Зависимость электрофизических параметров керамики состава ЦТС-ЦНН от метода синтеза и условий спекания

Режим синтеза / Т и время / Параметр	Способ синтеза порошка		
	1(а)	1(б)	2
	950°С (5часов)	850°С (5 часов)	750°С (3 часа)
$d_{исх}$, мкм	0,9 – 1,2	0,45 – 0,72	0,15 – 0,45
$T_{спек.}$, °С	1225	1150	1100
d* ,мкм	2,0-3,5	1,0-1,5	0,6-0,9
ρ(г/см^3) керамики	7,30-7,40	7,75-7,80	7,6-7,72
$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$	2750-2800	3280-3400	3500-3800
tg δ	0,019-0,022	0,017-0,020	0,016-0,019
K_p	0,44-0,48	0,62-0,64	0,65-0,67
T_c, °С	180	175	175
$-d_{31}$, пКл/Н	158-165	225-240	250-285
d_{33}, пКл/Н	425-445	540-585	595-625

$d_{исх.}$ и d* диаметры частиц шихты и зёрен керамики, соответственно

НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ «ХИМИЧЕСКОЙ СБОРКИ» СЛОИСТЫХ ФАЗ ТИПА ТИТАНАТА ВИСМУТА

Нестеров А.А., Панич А.Е., Панич А.А

Южный федеральный университет. г.Ростов-на-Дону.

Пьезокерамические материалы на основе фаз слоистых титанатов ряда s- и p-элементов (ВСПС) являются основой пьезодатчиков, широко применяющихся в современной аэрокосмической промышленности. Это объясняется тем, что они характеризуются рекордно высокой стабильностью пьезоэлектрических и диэлектрических параметров в широком интервале температур (70 – 900°К) и давлений (0,001Па – 300 мПа), благодаря тому, что точка Кюри (T_c) слоистых титанатов висмута и натрия-висмута лежит выше 900°К, что значительно превышает значения T_c фаз системы титанат-цирконат свинца. Необходимо так же отметить, что рассматриваемые фазы не содержат в своём составе катионов свинца, что делает разработку и внедрение материалов на их основе актуальными с экологической точки зрения. К недостаткам пьезокерамики данной группы необходимо отнести: относительно низкие значения её пьезоэлектрических и диэлектрических параметров (ЭФП), технологические проблемы, связанные с синтезом порошков исходных фаз и трудности формирования материала с заданной микроструктурой (размер и ориентация зёрен, размер, доля пор и их распределение в объёме образца и т.д.). Одним из способов решения данных проблем может быть технология, основанная на методе «химической сборки» предусматривающем снижение энергии активации процесса синтеза пьезофаз, а также получение их порошков с заданной полосой и величиной дисперсности. Метод основан на использовании в качестве прекурсоров многоядерных полимерных комплексов титана (IV), имеющих сходное строение с подрешёткой (В) целевого продукта. Указанные комплексы в процессе синтеза играют роль матриц, заполняемых катионами, формирующими подрешётку (А) слоистой фазы. Как синтез прекурсоров, так и их заполнение, протекающее за счёт процессов обмена или внедрения, могут быть осуществлены при стандартных условиях (с.у.). Это позволяет понизить температуру формирования целевого продукта реакции в среднем на 450 – 500°К и сократить время обжига шихты в 3 – 5 раз. Снижение энергии активации обсуждаемого процесса позволяет сохранять количественный состав целевых продуктов, что практически невозможно сделать в рамках традиционных технологий, основанных на методе твёрдофазных реакций.

Изменяя условия синтеза исходных матриц, природу и концентрацию взаимодействующих с ними прекурсоров, а также условия термообработки первичных промежуточных фаз, можно целенаправленно изменять средний размер частиц синтезируемых порошков от 15-30 нм до 1500 нм, а также, в зависимости от поставленных задач, варьировать полосу их дисперсности от 150 до 1200 нм. Изготовление шихты заданного гранулометрического состава позволяет управлять процессами первичной и вторичной рекристаллизации, непосредственно, в процессе спекания прессзаготовок и, следовательно, формировать оптимальную (для определённого сочетания ЭФП) микроструктуру керамического каркаса.

Разработка технологии получения любого керамического пьезоматериала, основанного на методе «химической сборки» включает: а) поиск полимерной матрицы, способной играть роль прекурсора в рассматриваемом процессе; б) определение условий её синтеза при с.у.; в) подбор форм соединений элементов, формирующих подрешётку (А), способных взаимодействовать с выбранной матрицей при с.у. с образованием промежуточной фазы заданного состава; г) исследование процесса превращения промежуточного продукта в порошок целевой фазы и выявление параметров процесса,

влияющих на дисперсность данного порошка; д) определение условий спекания прессзаготовок, изготовленных из порошков с различной полосой дисперсности.

В рамках данной работы в качестве прекурсоров синтеза фаз $Na_{0,5}Bi_{4,5}Ti_4O_{15}$ и $Bi_4Ti_3O_{12}$ были использованы три различные формы гидроксидов титана (IV), осаждённые из нитратных растворов соединений Ti(VI) при н.у. с помощью 5% раствора NH_3. В свою очередь эти растворы были получены растворением различных форм $TiO_2 \cdot xH_2O$ в 30% растворе HNO_3. Эти формы были: (1) - осаждёны из 0,5 М раствора $H_2[TiCl_6]$,; (2) – образовались в процессе гидролиза тетрабутилата Ti(VI); (3) – осаждёны из раствора, формирующегося при кислотном гидролизе титанатов натрия. Полученные матрицы вводились во взаимодействие с Bi_2O_3 (при синтезе $Bi_4Ti_3O_{12}$) или с суспензией Bi_2O_3 в 30% растворе NaOH (при синтезе $Na_{0,5}Bi_{4,5}Ti_4O_{15}$). С помощью методов ДТА, РСА и РФА установлено, что последовательные процессы во всех системах протекают в интервале температур 280 – 600°К и на первом этапе приводят к образованию аморфного продукта реакции, при нагревании которого происходит кристаллизация целевых фаз. Показано, что химическая предыстория матрицы оказывает существенное влияние, как на условия кристаллизации и диаметр частиц порошков целевых продуктов, так и на параметры элементарных ячеек, формирующихся в системе фаз. Полученные результаты обсуждены с точки зрения возможного строения прекурсоров. Установлено, что способ получения исходных матриц оказывает влияние и на процессы вторичной рекристаллизации получаемой наноразмерной шихты, а также на ЭФП пьезокерамики, изготавливаемой на её основе (таб. 1).

Таблица 1 – ЭФП пьезокерамики, изготовленной из шихты, синтезированной с использованием различных прекурсоров.

способ	фазовый состав	D ср. частиц шихты (нм)	D ср. зёрен керамики (нм)	$d_{33} \cdot 10^{12}$ (Кл/Н)	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$
1	$Bi_4Ti_3O_{12}$	28	820	10 - 12	85 - 90
2	$Bi_4Ti_3O_{12}$	46	630	14 - 16	120 - 140
3	$Bi_4Ti_3O_{12}$	87	490	17 - 19	150 - 160
1	$Na_{0,5}Bi_{4,5}Ti_4O_{15}$	22	980	22 - 24	110 - 130
2	$Na_{0,5}Bi_{4,5}Ti_4O_{15}$	35	690	24 - 27	120 - 140
3	$Na_{0,5}Bi_{4,5}Ti_4O_{15}$	79	510	30 - 35	160 - 190

С целью повышения пьезоэлектрических параметров и значений $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$ в фазы $Na_{0,5}Bi_{4,5}Ti_4O_{15}$ и $Bi_4Ti_3O_{12}$ были легированы титанатами и цирконатами свинца, кальция, стронция и бария. Это позволило, не меняя технологию формирования целевых фаз и условий спекания прессзаготовок, создать материалы с температурой Кюри от 420 до 550°С (т.е. получить пьезопреобразователи с диапазоном рабочих температур от 400°С до 520°С - табл. 1). Эти материалы сохраняют высокую стабильность пьезопараметров при изменении температуры и давления в системе.

Таблица 2 – ЭФП пьезокерамики, изготовленной из шихты, синтезированной с использованием различных прекурсоров.

фазовый состав	D* ср. частиц шихты (нм)	D* ср. зёрен керамики (нм)	$d_{33} \cdot 10^{12}$ (Кл/Н)	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$
НВТ-ЦТВС-1	83	720	65 - 70	280 - 330
ВТ-ЦТВС-1	94	660	45 - 60	230 - 270

D* ср. – средний диаметр объектов

Температура спекания керамики всех типов 1100 - 1150°С, образцы для измерения ЭФП в форме стандартных дисков, электроды серебряные, поляризация в силиконовом масле при 200°С полем до 60 кВ/см, время поляризации – 30 минут.

ДЕГИДРАТАЦИЯ КСЕРОГЕЛЯ ЦЕЛЕВОЙ ФАЗЫ КАК СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ ЦТС-ВОЗДУХ ТИПА 3 – 3 И 3 – 0

Нестеров А.А., Панич А.А., Свирская С.Н., Пахомов А.С.

Южный федеральный университет. г.Ростов-на-Дону.

Пьезопреобразователи, способные непосредственно трансформировать всестороннее переменное давление в электрический сигнал, находят применение при изготовлении приборов медицинской диагностики, гидрофонов, датчиков сейсмического контроля и вибрации, акустически управляемых устройств и т.д.. Одним из типов объёмно-чувствительных материалов являются пьезокомпозиты типа 3:3 и 3:0 на основе пьезофаз кислородно-октаэдрического типа. В подавляющем большинстве технологий этих материалов предусматривается формирование пористого каркаса заданного типа связности за счёт удаления из прессзаготовки порообразователя. К недостаткам таких технологий относится их трудоёмкость, проблемы утилизации продуктов разложения или возгонки порообразователей и не всегда достаточная воспроизводимость свойств и макроструктуры конечных изделий. С целью совершенствования способов формирования пористых каркасов и установления влияния размеров пор на электрофизические параметры пьезокомпозитов типа 3:3 и 3:0, нами разработана совокупность приёмов, позволяющих изготавливать пористые керамические каркасы с общей пористостью до 72 об.% без использования порообразователя. В основе этих приёмов лежат исследования по формированию фаз кислородно-октаэдрического типа методом «химической сборки», в процессе которой полимерные матрицы, представляющих собой многоядерные комплексы титана (IV), циркония(IV), олова (IV) и марганца(IV), и имеющие сходное строение с подрешёткой (В) целевого продукта, заполняются катионами, формирующими подрешётку (А) целевой фазы. Это взаимодействие реализуется за счёт самопроизвольно протекающих при с.у реакций обмена или внедрения. Продуктом низкотемпературного синтеза является аморфная гелеобразная фаза, которая по данным ДТА и ТГА разлагается при температуре от 330 до 600°К (при нагревании образца со скоростью 5°К) и содержит не более 20 масс.% целевого продукта реакции (рис.1). При нагревании исходного аморфного продукта реакции со скоростью 1°К/мин в интервале температур 310 – 400°К происходит формирование пористого ксерогеля, который представляет собой аморфный целевой продукт, изменение массы которого при дальнейшем нагревании и кристаллизации не превышает 8 масс.%.

Для изготовления пористых каркасов с содержанием пьезофазы от 90 до 28 об.% предварительно полеченный методом твёрдофазных реакций порошок легированной фазы ЦТС с размером отдельных частиц (по данным сканирующей и растровой микроскопии) менее 1,8 мкм, смешивался, в заданном соотношении, с аморфной первичной фазой того же состава, полученной методом «химической сборки». Полученная шихта формовалась при минимальном одноосном давлении и полеченные заготовки со скоростью 1°К/мин нагревались в интервале температур 310 – 400°К.

В дальнейшем, после часовой изотермической выдержки, образцы нагревались до температуре 1300 – 1350°К, при которой происходило их спекание. Указанный режим позволяет изготовить керамический каркас, преимущественно имеющий закрытую пористость (связность типа 3:0). Для получения керамики с открытой пористостью и смешанным типом пористости используются более сложные режимы термообработки заготовок. Общая пористость образцов определялась путём сравнения экспериментальных плотностей керамик с рентгенографической плотностью пьезофазы, открытая пористость

– методом влагопоглощения (ГОСТ 2409-80), закрытая пористость - как разность между общей и открытой пористостью.В таблице 1 представлены ЭФП пористой керамики на основе пьезофазы $Pb_{0.975}Ca_{0.01}Ba_{0.01}Sr_{0.005}(Ti_{0.48}Zr_{0.52})O_3$ + 1,4 масс. % Bi_2O_3.

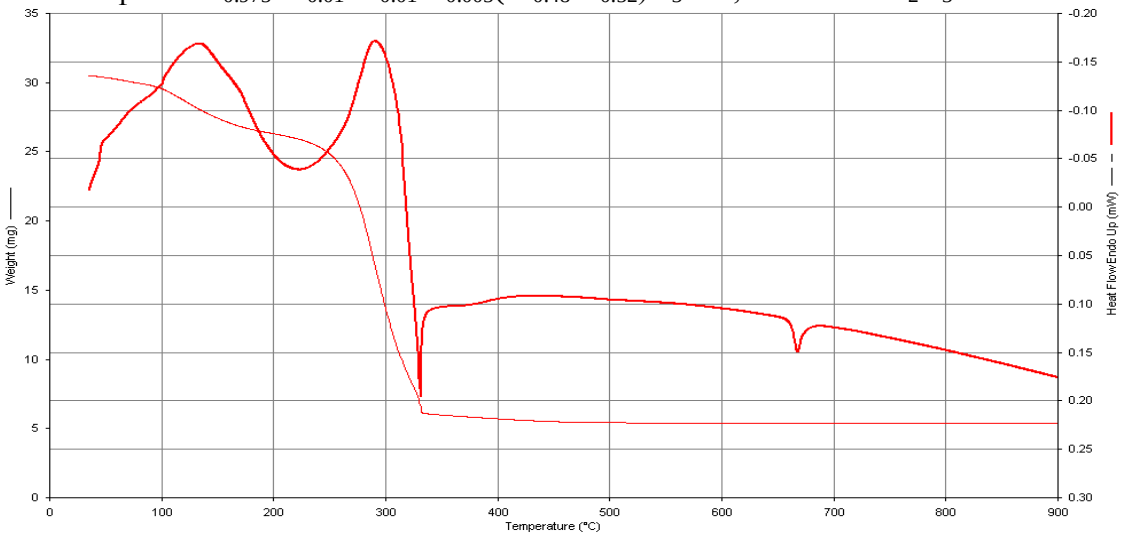


Рис.1. Данные ДТА и ТГА аморфной фазы образующейся в системе при синтезе методом «химической сборки» пьезофазы состава:$Pb_{0.975}Ca_{0.01}Ba_{0.01}Sr_{0.005}(Ti_{0.48}Zr_{0.52})O_3$ + 1,4 масс. % Bi_2O_3.

Не зависимо от типа связности керамического каркаса, поры в образцах представляют собой совокупность каналов различной протяжённости с поперечным сечением от нескольких единиц, до нескольких десятков нм. Обсуждены причины отличия свойств полученных материалов, от свойств пьезокомпозитов того же типа, полученных в рамках традиционных технологий.

Таблица 1. ЭФП пористой керамики, сформировавшейся в процессе дегидратации и последующей кристаллизации пьезофазы состава $Pb_{0.975}Ca_{0.01}Ba_{0.01}Sr_{0.005}(Ti_{0.48}Zr_{0.52})O_3$ + 1,4 масс. % Bi_2O_3.

пористость об. %		$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$	$-d_{31}$пК/Н	d_{33} пК/Н
открытая	закрытая			
18	4,5	1220	106	293
37	8,8	710	42	301
46	12,4	275	26	298
54	18,1	210	17	308
3,6	22, 5	1240	122	318
7,3	40,1	1050	61	322
11,9	46,4	890	39	312
14,1	57,8	645	24	326

СИНТЕЗ ФАЗ КИСЛОРОДНО-ОКТАЭДРИЧЕСКОГО ТИПА, ОСНОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ МЕТОДА ХИМИЧЕСКОГО И СТРУКТУРНОГО ПОДОБИЯ

Нестеров А.А., Панич А.Е., Панич А.А., Доля В.К.,Карюков Е.В.

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Керамические материалы на основе фаз кислородно-октаэдрического типа используются для изготовления функциональных устройств, находящих применение в

различных отраслях современной науки и техники. Наиболее распространённым способом синтеза этих фаз до настоящего времени остаётся процесс, основанный на взаимодействии порошков кристаллических оксидов или солей кислородных кислот при высоких температурах – метод твёрдофазных реакций (МТФР). Высокие температуры обжига образцов, в сочетании с длительностью термообработки, приводят к нарушению состава продуктов реакции за счёт испарения или термического разложения прекурсоров. Так, например, суммарная потеря PbO при твердофазном синтезе порошков фаз системы $PbTiO_3$-$PbZrO_3$ (ЦТС) и последующим спекании керамики, изготавливаемой на их основе, может достигать 10 мол.%, а оксиды ряда p- и d-элементов разлагаются с образованием низших оксидов и т.д. Даже если указанные негативные явления в в процессе синтеза не протекают, конечный продукт реакций будет отвечать состоянию системы, характерной для некоторой эффективной температуры, ниже которой подвижность ионов и дефектов решётки мала. В связи с этим, фазы, синтезируемые в рамках МТФР, при с.у. характеризуются высокой и неконтролируемой неравновесной дефектностью (в катионной и анионной подрешётках). Это, как правило, негативно влияет на электрофизические параметры и скорость старения материалов, созданных на их основе. Указанные проблемы стимулируют поиск альтернативных МТФР технологий синтеза фаз рассматриваемого типа, а также приёмов, способных устранить недостатки МТФР. Однако, известные нам попытки, предпринимаемые в указанном направлении, сводятся, в основном, к замене известных прекурсоров на более активные, т.е. на снижение энергии активации твёрдофазных реакций. Такой подход решает часть кинетических проблем рассматриваемого процесса синтеза, но только за счёт создания новых проблем кристаллохимического характера: высокодефектные активные прекурсоры приводят к формированию (при более низких температурах по сравнению с МТФР) фаз с ещё большей неравновесной дефектностью, чем в МТФР. При этом тип этой дефектности, преимущественно, задаётся типом дефектности прекурсора, что объясняет противоречивость литературных данных по проблемам синтеза целевых продуктов реакций фиксированного состава.

Для устранения недостатков известных методов синтеза фаз кислородно-октаэдрического типа нами был предложен метод их формирования в процессе блочной «химической сборки». Для получения в рамках этого метода первичных зародышей целевой фазы используются наноразмерные полифункциональные матрицы, строение каркаса которой сходно со строением подрешётки (B) конечного продукта реакции. В качестве матриц, например, могут, например, применяться бифункциональные многоядерные ацидогидроксоаква- или ацидоаминоаквакомплексы. Эти гелеобразные матрицы (за счёт проведения реакций обмена или внедрения) при с.у. заполняются катионами, формирующими подрешётку A синтезируемой фазы. Полученный аморфный промежуточный продукт, в процессе дегидратации (осуществляемой термическим или химическим способом) превращается в кристаллический продукт реакции. Согласно данным ДТА и ТГА (дериватограф DiamondTG/DTA, PerkinElmer) при термическом варианте дегидратации промежуточного продукта формирование кристаллических фаз происходит в интервале температур 110 - 370°C и зависит, как от структуры (размеров) частиц матрицы, так и состава реагентов взаимодействующих с ней. Методами РФА и РСА (дифрактометр ARLX`Tra, приставка HTKA-1200) установлено, что формирование при указанных температурах в рассматриваемых системах кристаллических фаз подчиняется правилу ступенчатых переходов Отствальда, согласно которому наибольшую вероятность образования имеет полиморфная модификация синтезируемого веществ, имеющая минимальную энергию активации процесса синтеза. Например, при получении указанным способом фаз типа ABO_3, $A_{1-x}\acute{A}_xBO_3$, $AB_{1-x}\dot{B}_xO_3$ и $A_{1-x}\acute{A}_xB_{1-y}\dot{B}_yO_3$ (A и Á = Ca, Sr, Ba, Pb, B и Ḃ = Ti, Zr, Hf, Sn, Mn) на первом этапе наблюдается кристаллизация кубических фаз со структурой типа перовскита или пирохлора. Структура первичных

зародышей зависит от состава прекурсора, взаимодействующего с матрицей, но не зависит от качественного и количественного состава синтезируемого вещества. Образование фаз со структурой пирохлора, по-видимому, связано с сохранением в аморфных первичных продуктах гидроксогрупп или однозарядных анионов кислотных остатков. Это способно изменить состав продукта кристаллизации до $ABO_3X_{0,5}$ ($A_2B_2O_6X$), где X = OH^-, NO_2^- и т.д..

Диаметр областей когерентного рассеяния (ОКР) кристаллических зародышей, образующихся па первом этапе, можно варьировать в пределах от 10-15 нм до ≈ 50 нм, за счёт изменения технологических параметров процесса их синтеза. Это связано с тем, что размер кристаллических частиц, получаемых в процессе дегидратации первичного аморфного продукта, предопределяется размерами матриц, используемых на начальном этапе синтеза. При повышении температуры систем наблюдается рост размеров ОКР нанокристаллов за счёт окружающих их аморфной фазы и последовательная трансформация метастабильных фаз в стабильные. Методом сканирующей зондовой микроскопии (система SolverPro-M, NT-MDT) установлено, что вплоть до температур обжига шихты 700-800°C конечный размер её частиц предопределяется, преимущественно, числом первоначальных центров кристаллизации, сформировавшихся на начальном этапе. Также установлено, что получаемые в этих условиях порошки, термодинамически стабильных при с.у. фаз, характеризуются узкой полосой дисперсности. Диаметр же их частиц можно целенаправленно варьировать в пределах от 50-70 нм до 600-800 нм. Показано также, что в дальнейшем размер частиц порошка может быть увеличен за счёт процесса вторичной рекристаллизации. В настоящее время разработаны варианты метода «химической сборки» фаз со структурой перовскита, пирохлора, тетрагональной калий-вольфрамовой бронзы и шпинели, позволяющие целенаправленно варьировать средний диаметр частиц синтезируемого порошка от десятков до 1500 нм.

ФАЗЫ СИСТЕМ $BI_{0,5}NA_{0,5}TIO_3$ – $PBTIO_3$ И $BI_{0,5}K_{0,5}TIO_3$ – $PBTIO_3$, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В РАМКАХ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ.

Нестеров А.А., Панич А.Е., Панич А.А., Свирская С.Н., Васильев И.В.

Южный федеральный университет. г.Ростов-на-Дону.

Пьезокерамика на основе фаз легированного $PbTiO_3$ используются для изготовления приборов ультразвуковой диагностики, фильтров на поверхностных акустических волнах, гидрофонов и других устройств, благодаря её высоким пьезопараметрами. В настоящее время установлено, что анизотропия пьезомодулей (d_{33}/d_{31}) таких материалов связана не только с характерной для $PbTiO_3$ анизотропией диэлектрической проницаемости ($\varepsilon^{\sigma}_{11}/\varepsilon^{\sigma}_{33}$), но и с изменением макроструктуры керамики в процессе её поляризации. Это связано с тем, что при достижении определённой напряжённости поляризующего поля на границах зёрен керамики образуются макродефекты, ориентированные, преимущественно, параллельно направлению поляризации, что и приводит к резкому снижению значений d_{31} и планарного коэффициента электромеханической связи материала (K_p). В свою очередь, возможность микрорастрескивания керамического каркаса и скорость роста протяжённых макродефектов, должны предопределяться суммарной площадью межзёренных границ в образцах, их механической прочностью, степенью текстурирования керамики и т.д.. Эти характеристики материалов, преимущественно, зависят от параметров исходной шихты, так как именно они регулируют процессы первичной и вторичной рекристаллизации, протекающие при обжиге прессзаготовок.

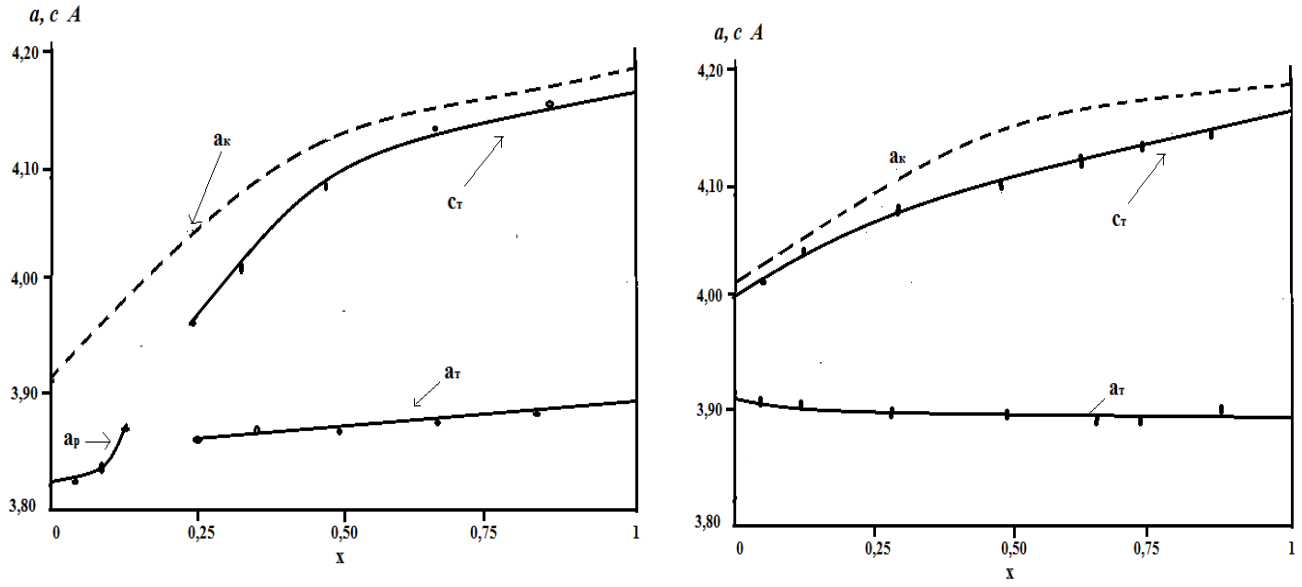


Рис.1. Параметры элементарных ячеек фаз состава $Pb_x(Bi_{0,5}Me_{0,5})_{1-x}TiO_3$ (Me = Na) - слева и (Me = K) - справа, синтезированных при 700°К (пунктир) и 950°К (время обжига – 60 минут).

Фазы систем $Bi_{0,5}Na_{0,5}TiO_3$ – $PbTiO_3$ и $Bi_{0,5}K_{0,5}TiO_3$ – $PbTiO_3$ являются перспективной основой для изготовления анизотропной пьезокерамики, так как изменением их состава можно в широких пределах варьировать степень искажённости элементарных ячеек пьезофаз и их спонтанной поляризации, а, следовательно, управлять изменением объёмов зёрен керамики при фазовом переходе. Однако широкого распространения пьезоматериалы на основе фаз указанных систем до настоящего времени не получили. Это объясняется низкой воспроизводимостью их электрофизических параметров (ЭФП), связанной с проблемами твёрдофазного синтеза данных фаз, основная из которых заключается в испарении из прессзаготовок соединений свинца, натрия, калия и висмута в процессе их 20 часового обжига при 1200 – 1300°К, что ведёт к нарушению состава и структуры продуктов реакций. Снижение температуры и времени синтеза в условиях данного метода синтеза невозможно в связи со сложным, последовательно-параллельным механизмом формирования фаз в рассматриваемых системах. В связи с этим нами были разработаны несколько вариантов технологий синтеза указанных веществ, основанных на взаимодействии при н.у. определённых форм гидроксидов титана, имеющих сходное строение с подрешёткой В целевых фаз, с оксидами свинца (II) и висмута(III), а также с гидроксидами натрия и калия. В процессе этого взаимодействия на первом этапе образуется рентгеноаморфный продукт, который, согласно данным ДТА и ТГА, разлагается в интервале температур 300 – 700°К с образованием кубических фаз со структурой типа перовскита (рис.1). По данным РСА величины областей когерентного рассеяния первичных кристаллитов, формирующихся при 650 - 700°К, уменьшаются по мере роста значения (x) в фазах типа $Pb_x(Bi_{0,5}Me_{0,5})_{1-x}TiO_3$ (Me = Na, K) от 50 – 65 нм до 25 – 30 нм. Дальнейшее увеличение температуры и времени обжига шихты, согласно данным зондовой и растровой электронной микроскопии, способствует быстрому росту размеров частиц порошков и трансформации, образующих их кубических фаз, в тетрагональные. Изменение строения фаз, относящихся к областям, прилегающим к $PbTiO_3$, наблюдается при размерах частиц $\geq$ 45 – 60 нм, тогда как этот переход для фаз с $x \leq 0,3$ завершается только при достижении частицами диаметра $\approx$ 150 – 170 нм. Дальнейшее увеличение размеров кристаллов за счёт протекающего в системе процесса вторичной рекристаллизации приводит к росту значений c/a тетрагональных фаз и образованию ромбоэдрических фаз в системе $Bi_{0,5}Na_{0,5}TiO_3$ – $PbTiO_3$ (рис.1). Максимального значения c/a тетрагональных фаз достигает при 60 минутном обжиге образцов при 850 – 950°К. Для

образцов с $x \leq 0,85$, прокалённых выше 1200°К, наблюдается уменьшение значений с/а элементарных ячеек пьезофаз и появление примесей, что связано с термической деструкцией целевого продукта реакции.

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ФОРМИРОАНИЯ МИКРОСТУКТУРЫ КЕРАМИКИ, ОСНОВАННЫЕ НА ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТЕЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ И РОСТА ЗЁРЕН ПЬЕЗОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ФАЗ СИСТЕМЫ ЦТС

Нестеров А.А., Панич А.А., Доля В.К., Криков В.В., Васильев И. В.

Южный федеральный университет. г. Ростов-на-Дону

Электрофизические параметры (ЭФП) пьезокерамических материалов предопределяются степенью и видом их структурирования на нано- мезо- микро- и макроуровнях. Это связано с тем, что они зависят не только от факторов, влияющих на значение спонтанной поляризации микрочастиц в заданном температурном интервале (строение элементарных ячеек пьезофаз, размер, дефектность, форма зёрен керамики или плёнки, размер, тип, форма и ориентация доменов в системе, тип и природа доменных стенок и т.д.), но также от архитектуры образца, совокупность элементов которой предопределяет его механические характеристики. Многообразие факторов, способных варьировать ЭФП пьезокерамики, с одной стороны, затрудняет создание технологий, позволяющих повысить воспроизводимость конечного продукта, но с другой открывают возможность создания материалов с задаваемой совокупностью механических, пьезоэлектрических и диэлектрических свойств.

Очевидно, что все виды структурирования неразрывно связаны между собой и любые изменения в одном из них неизбежно приведут к большим или меньшим изменениям (количественного или качественного характера) – в других. Поэтому целью данной работы было исследование влияния аморфных наноразмерных порошков фаз различного состава не только на процесс формирования зёрен при спекании керамики, но и на процессы возможной деградации пьезофазы, лежащей в основе пьезоматериала, а также на элементы её архитектуры.

В качестве модельного объекта использована пьезофаза состава $(Pb_{0.975}Ca_{0.01}Ba_{0.01}Sr_{0.005}(Ti_{0.48}Zr_{0.52})O_3$ + 1.4 вес. % Bi_2O_3, порошки которой со средним диаметром 1,2 мкм были получены методом твёрдофазных реакций. В качестве стеклодобавок были выбраны различные аморфные порошки на основе фаз системы B_2O_3 – PbO – ZnO. Такой выбор предопределялся широкой областью существования стеклофаз в указанной системе, относительно низкими температурами их размягчения (360 – 420°С), хорошим смачиваем зерн керамики расплавом, а также малой вероятностью химического взаимодействия добавок с пьезофазой (различная координация ионов в боратных стеклах и в пьезофазе). В качестве добавки второго типа использовалась ортофосфорная кислота, которая при нагревании взаимодействует с частицами пьезофазы по поверхности, образуя стеклофазы системы P_2O_5 – PbO – TiO_2, имеющие температуру размягчения ≥ 850°С.

Аморфная фаза системы B_2O_3 – PbO – ZnO была получена двумя способами. В рамках первого из них PbO и ZnO в виде ультрадисперсных порошков при интенсивном перемешивании добавлялись в 25% водный раствор H_3BO_3 при T ≈ 100°С. После удаления из системы растворителя был получен рентгеноаморфный порошок, представляющий собой совокупность частиц, которые, по данным зондовой микроскопии, имеют диаметр менее 220 нм, высокую склонность к агломерации и набуханию на воздухе. Другой метод включал этап варки стекла, заданного состава, с последующим диспергированием стеклофазы в планетарной мельнице (конечный диаметр частиц менее 340 нм). Для изготовления шихты (ЦТС – стеклофаза) суспензия порошка стеклофазы в этаноле смешивалась в барабанном смесителе с порошком пьезофазы. После удаления спирта

шихта прессовалась. Отдельные партии полученных заготовок обжигались при температурах 900, 1000, 1050, 1100, 1150 и 1200°С (время изотермической выдержки от 1 до 6 часов). Ортофосфорная кислота добавлялась к порошку ЦТС в виде 10% водного раствора, что в процессе перемешивания шихты позволило равномерно распределить добавку в объёме системы. Условия обжига прессзаготовок такие же, как в предыдущем случае.

Усадка образцов во всех исследованных системах наблюдается, начиная с минимальной температуры обжига. Плотность образующейся керамики, содержащей менее 2,5 мас.% добавки любого вида, в интервале температур 900 – 1100°С растет, как по мере увеличения времени, так и температуры нагревания. Рост температуры спекания не способствует дальнейшему росту плотности образцов, что связано с резким увеличением скорости вторичной рекристаллизации в системах с добавками боратного стекла (рис. 1) или с изменением плотности упаковки зёрен (добавка фосфатных фаз).

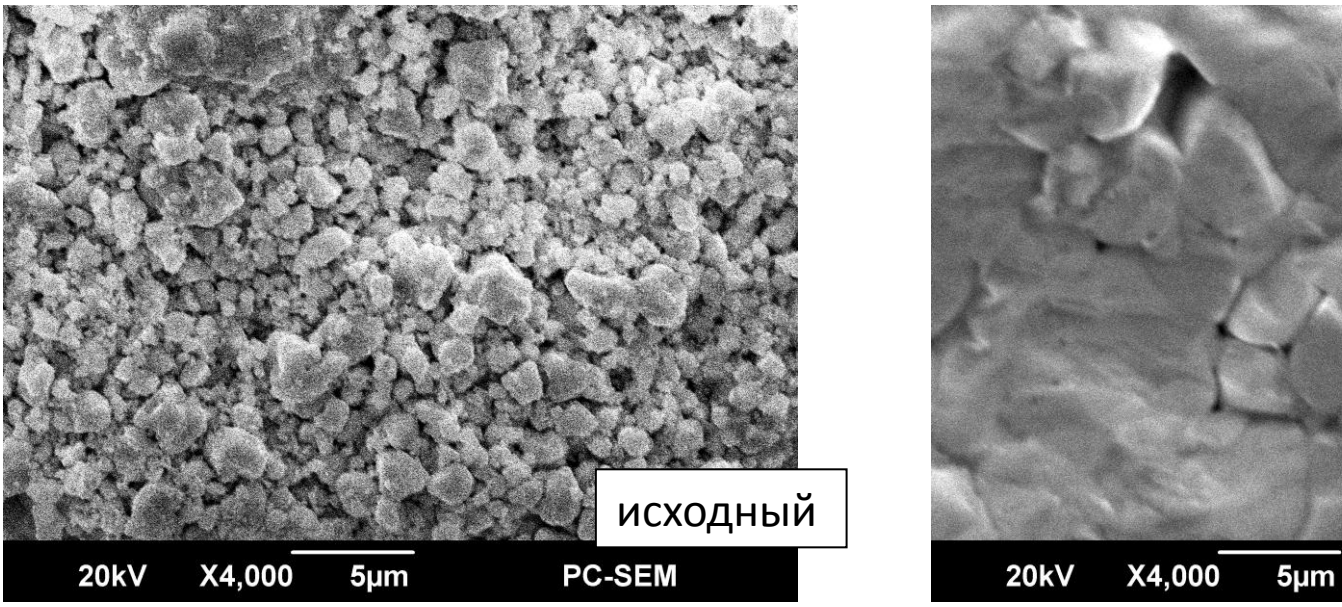


Рис.1. Данные РЭМ для образцов материала типа ЦТС с добавкой 2,5 мол.% боратного стекла

При содержании боратного стекла в системе до 2,5 масс.% и фосфатного до 1,5% масс.% рост плотности керамических каркасов приводит к увеличению диэлектрической проницаемости материалов и росту значений их пьезохарактристик. По мере дальнейшего увеличения массовой доли добавок в системах, значения ЭФП снижаются (рис.2).

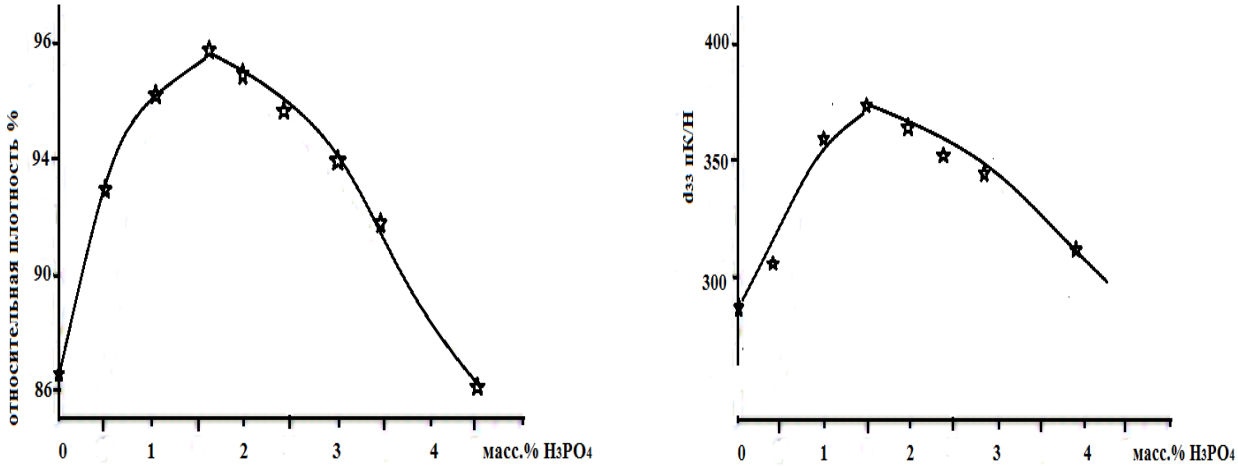


Рис.2. Изменения плотности (слева) и значений пьезомодуля d_{33} (справа) керамики ЦТС, изготовленной с использованием добавки H_3PO_4.

Установлено, что указанные изменения в системах зависят не только от условий спекания керамики, но и от размеров частиц, вводимых в шихту стеклофаз системы B_2O_3 – PbO – ZnO, а также от способов их синтеза. Отмечено изменение точки Кюри пьезоматериалов с ростом концентрации добавки в системе. В работе обсуждены механизмы взаимодействия стекла с пьезофазой, и возможности использования полученных результатов в технологии пьезокерамики.

ОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КАКАСОВ ИЗ НАНО- И УЛЬТРАДИСПЕРНЫХ ПОРОШКОВ ПЬЕЗОФАЗ СИСТЕМЫ ЦТС

Нестеров А.А., Панич А.А., Свирская С.Н., Мараховский М.А.

Южный федеральный университет. г. Ростов-на-Дону.

Как известно, процесс формирования керамического каркаса состоит из трёх основных стадий, протекающих в прессзаготовке по последовательно-параллельному механизму. При этом, хотя движущие силы процессов первичной рекристаллизации, роста зёрен, спекания и вторичной рекристаллизации все направлены на снижение величины свободной энергии системы, их природа или способ достижения конечной цели, зачастую, различны и не редко входят в противоречие друг с другом. Кроме этого понятие активности пресспорошков также не является однозначным, так как дефекты, повышающие скорость первичной рекристаллизации, по завершении процесса теоретически должны исчезнуть (для достижения системой минимума свободной энергии), что сделает невозможным рост зёрен без дополнительной активации системы. Так как на практике при изготовлении керамического каркаса активация шихты используется только на предварительной стадии, необходимо признать, что процессы первичной рекристаллизации и роста зёрен в системе протекают одновременно. Образование первичных зародышей отвечает локальным минимумам свободной энергии систем и, следовательно, их кристаллохимическое строение связано с их размерами (областями когерентного рассеяния). Полученные данные свидетельствуют, что кристаллохимическое совершенство первичных зародышей в шихте растёт по мере увеличения их объёма, вплоть до достижения критического значения, а дальнейшие изменения в системе могут быть связаны только с вариацией состава пьезофаз, вызванной термической деструкцией.

Анализ процессов формирования фаз со структурой типа перовскита в рамках метода «химической сборки» и высокоэнергетического диспергирования выявил ряд научно – технологических проблем, связанных с изготовлением высокоэффективной пьезокерамики на основе синтезированных нано- и ультрадисперсных порошков. Хотя эти проблемы имеют различную природу, но в их основе лежит избыточная свободная энергия нано- и ультрадисперсных частиц порошков пьезофаз минимального критического размера, вызванная, преимущественно, высоким отношением площади поверхности частиц к их объёму (величиной поверхностной энергии).

В частности, высокое значение поверхностной энергии приводит к повышенной сорбционной ёмкости порошка, способного поглощать пары воды и газообразные вещества различного состава (по данным ТГА до 10 % от массы порошка). Обращает на себя внимание, что порошок материалов типа ЦТС после помола в планетарной мельнице и сушки при 100-120°C, при одинаковом размере частиц с порошком того же состава, полученного методом «химической сборки», имеет большую сорбционную ёмкость. Это свидетельствует о более высокой концентрации неравновесных дефектов в поверхностном слое этих частиц. Наличие примесных фаз на поверхности частиц пресспорошков снижает их химическую активность, что значительно уменьшает скорость массопереноса, а наличие сорбированного слоя легколетучих фаз способствует нарушению контакта между

частицами порошков в прессзаготовках, что значительно сокращает площадь и протяжённость реакционной зоны, при любом механизме роста зёрен и спекания. Решить указанную проблему за счёт значительного повышения температуры обжига шихты невозможно, так как оно приведёт к аннигиляции неравновесных дефектов и формированию небольшого числа первичных зёрен. Это резко снижает скорость спекания прессзаготовок и приводит к формированию крупнозернистой керамики, характеризующейся высокой пористостью и низкими прочностными характеристиками.

Возможным приёмом борьбы с рассматриваемой проблемой является горячее прессование образцов, когда контакт между частицами формируется по мере удаления из системы газообразных сорбированных фаз под действием внешнего давления. Однако метод горячего прессования подавляет протекание процесса вторичной рекристаллизации, что в случае пьезофаз не позволит сформировать необходимый тип доменной структуры, оптимальная степень которой также связана с критическим размером зерна.

Нами задача повышения плотности получаемой керамики была решена за счёт целенаправленной модификации поверхности нано- и ультрадисперсных частиц. При подборе модификаторов учитывалось, что на этапе прессования образца, поверхностный слой частиц порошка обеспечивает их скольжение друг относительно друга, и поэтому сорбированное вещество должно обладать достаточными вязко-текучими, пластическими свойствами, что характерно для высокомолекулярных жидкостей с низкой суммарной полярностью молекул. С другой стороны сорбат должен обеспечить вытеснение с поверхности частиц порошков ранее сорбированные вещества (что с учётом состава пьезофаз, означает наличие в молекулах сорбата высоко полярных групп, содержащих электродонорные атомы). Третье требование к кандидату в модификаторы - невысокая скорость выделения из системы сорбата (в виде продуктов возгонки разложения или окисления) при относительно низких температурах (т.е. до начала процесса «схлопывания» пор). Также важным условием является поверхностное взаимодействие добавки с пьезофазой, при котором, как минимум, концентрация поверхностных и протяжённых дефектов в частицах пьезофаз не снижается, а, как максимум, увеличивается. Нами в качестве примера композиции с указанной совокупностью характеристик предложен раствор на основе этилового спирта, содержащий 1 мас.% муравьиной кислоты и 5 мас.% поливинилового спирта. Результаты исследований зависимости плотности керамики и её микроструктуры от технологических параметров спекания и способов подготовки шихты показали, что предлагаемый приём позволяет повысить плотность керамических каркасов на основе пьезофаз фиксированного качественного и количественного состава с 69-76 до 92-95% от теоретически возможной.

Другой проблемой, связанной с использованием низкотемпературной нано- и ультрадисперсной шихты является уменьшения объема элементарных ячеек пьезофаз с ростом температуры и времени обжига порошков (за счёт снижения роли размерного эффекта), что может нарушить сплошность реакционных зон при спекании и привести к микрорастрескиванию образцов. Данное явление действительно было обнаружено экспериментально: усадка при спекании прессзаготовок, изготовленных их шихты, предварительный обжиг которой проводился при температурах ниже 600°С, не превышала 10%, а конечные изделия характеризовались не только низкой плотностью (даже при дополнительной модифицировании их поверхности), но и повышенной хрупкостью. Повышение же температуры синтеза порошков исходных фаз (выше 600°С) приводит к значительной рекристаллизации шихты и к снижению дефектности, образующих её частиц, что затрудняет формирование плотной керамики. Указанная проблема была решена методом «теплового удара»: помещение непрессованного порошка в предварительно нагретый до 700 - 750°С муфель и его выдержке при данной температуре в течение 10 – 20 минут. По окончании процесса тигель извлекался из печи и охлаждался на воздухе. Указанного времени и температуры оказалось достаточно, чтобы объем элементарных ячеек сегнетофаз уменьшился бы до минимума, процесс первичной

рекристаллизации завершился, а вторичная рекристаллизация частиц порошка была бы незначительной. Таким образом, в результате данного технического приема удалось сохранить высокую дисперсность шихты и ее достаточно высокую способность к спеканию. Приведённые данные свидетельствуют, что одним из определяющих условий развития и успешного применения нанотехнологий в области материаловедения является понимание механизмов формирования свойств наноразмерных объектов.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ШИХТЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ЦТБС-3

Нестеров А.А., Карюков Е.В., Малыхин А.Ю., Скрылев А.В., Бородаев А.В.

Южный федеральный университет, НКТБ «Пьезоприбор»

Пьезокерамические материалы находят широкое применение при изготовлении преобразователей, способных трансформировать механическую энергию в электрическую (прямой пьезоэффект) и электрическую в механическую (обратный пьезоэффект). Практика проектирования таких преобразователей энергии показывает, что уже сейчас многие традиционные электромеханические системы могут быть с успехом заменены пьезопреобразователями. Большинство современных устройств этого типа в качестве основы использует изделия (монокристаллы, керамику или плёнку), изготовленных из фаз системы $PbTiO_3$ – $PbZrO_3$ (ЦТС), обладающие приемлемыми значениями электрофизических параметров (ЭФП) и невысокой себестоимостью. Основными их недостатками являются: относительно низкая воспроизводимость ЭФП; значительная зависимость этих параметров от температуры; изменение значений параметров во времени (старение). Исследования показывают, что основной причиной указанных недостатков является сложность технологического воспроизведения мезо- и микроструктуры керамических каркасов, изготавливаемой в рамках традиционных технологий, основанных на методе твердофазных реакций (МТФР). Существуют альтернативные низкотемпературные технологи изготовления пьезофаз рассматриваемого типа [1], однако они ограниченно используются в промышленном производстве.

Используемый при синтезе фаз системы ЦТС метод твердофазных реакций приводит к нарушению их количественного состава за счёт испарения или термического разложения прекурсоров. Так, например, суммарная потеря PbO, при синтезе порошков рассматриваемых фаз в рамках МТФР, и последующем спекании изготавливаемой из них керамики, может достигать 10 мол.%, а целый ряд оксидов p- и d-элементов разлагается с образованием низших оксидов [2]. В результате, при обжиге прессзаготовок формируются продукты реакций, имеющие неконтролируемую и высокую, неравновесную дефектность, как в катионной, так и в анионной подрешётках. Это способствует получению керамики с пониженными значениями пьезопараметров и точек Кюри, а также повышению её электропроводности.

Другим недостатком МТФР является многостадийность процесса синтеза, что негативно сказывается на трудоемкости и себестоимости пьезоматериалов.

В данной работе нами была предпринята попытка оптимизировать процесс синтеза пьезоматериала ЦТБС-3 в рамках МТФР за счет:

1) осуществления процесса синтеза материала в одну стадию (снижение суммарного времени синтеза).

2) снижения температуры синтеза

3) варьированием метода подготовки шихты к синтезу(брикетирование- насыпной метод).

Методика эксперимента

На первом этапе нами была получена контрольная партия №1 пьезоматериала ЦТБС-3 стандартным 2-х стадийным методом. Синтез осуществлялся в закрытых

никелевых пакетах. Измельчение прекурсоров проводилось методом высокоэнергетического помола. Перед синтезом материал брикетировался.

Таблица 1 – Электрофизические параметры материала ЦТБС-3 в зависимости от режима синтеза и подготовки шихты.

№	Режим синтеза	Плотность г/см^3	tg δ	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$	d_{31}	d_{33}	V^E_1
1	2-х стадийный синтез (брикетированная шихта)	7,25	1,9	3071	161	385	3386
2	2-х стадийный синтез (гранулированная шихта)	7,21	1,8	2745	147	358	3364
3	1 стадийный синтез, скорость подъёма температуры максимальная	7,18	2,3	2975	116	277	3502
4	1 стадийный синтез, скорость подъёма температуры мин., макс. температура	7,23	1,8	3004	154	369	3364
8	1 стадийный синтез, скорость подъёма температуры мин., мин. температура	7,3	2,0	3053	148	391	3399
9	1 стадийный синтез, скорость подъёма температуры мин., средняя температура	7,22	2,2	3019	142	360	3419
	ОСТ 11.0444-87	7,21	2	2150	146	320	3530

Высокая температура синтеза (более 1000 ºС) материала ЦТБС-3 обусловлена низкой скоростью диффузии ионов бария в системе при относительной термодинамической стабильности используемого в качестве прекурсора карбоната.высокой температурой разложения прекурсоров, используемых при синтезе данного материала. Контроль процесса синтеза осуществлялся методом РФА с помощью дифрактометра ARLX`TRA.

Прессзаготовки в виде цилиндров спекались, в специальной засыпке при температуре 1260ºС в течение 2 часов. После механической обработки на стандартные образцы, наносились серебряные электроды, и они поляризовались при напряжении 1,6 кВ/мм.

Шихта партии №2 от партии №1 отличалась тем, что перед процессом синтеза не брикетировалась, а гранулировалась с помощью автоматического гранулятора ТИП 30 (с введением 4-5 мас.% воды). Гранулированная шихта помещалась в никелевый пакет и подвергалась термической обработке при условиях, описанных для партии №1.

В результате проведенного эксперимента и сравнения полученных электрофизических параметров образцов (таблица 1), было установлено, что керамика партии №1 превосходят по значениям пьезомодулей (d_{33}, d_{31}) образцы партии №2на 7-8,5%.

Одностадийный синтез (в брикетах) пьезоматериала ЦТБС-3 (партии №3 и №4) осуществлялся при температуре ниже 1050ºС. Партии №3 и №4 отличались между собой скоростью подъёма температуры. Остальные параметры синтеза аналогичны партии №1. ЭФП данных партий представлены в таблице 1. Как видно из полученных данных, образцы партии №4 имеют параметры, близкие к образцам партии №1, и превосходят параметры образцов партии №3. Таким образом, нам удалось установить возможность

проведения процесса синтеза в одну стадию, оптимизировав скорость повышения температуры в системе.

Синтез партии №5,6,7,8,9. осуществлялся в одну стадию при температурах от 800 до1000ºС соответственно. Параметры обжига аналогичны партии №1, шихта брикетировалась. ЭФП данных партий приведены в таблице №1. Рентгенофазовый анализ показал, что в процессе синтеза в партиях 1,2,3,4,7,8,9 формируется однофазовый продукт со структурой перовскита; в партиях 5 и 6 синтез целевой пьезофазы не завершён, что увеличивает электропроводность спеченных образцов и не позволяет провести их эффективную поляризацию.

Выводы.

1) Показано, что путём изменения параметров обжига прессзаготовок синтез порошка материала ЦТБС-3 может быть осуществлён в одну стадию, что снижает трудоёмкость данной технологической операции 25-30 %.
2) Тот же технологический приём (изменение скорости подъёма температуры в системе) позволил снизить температуру синтеза пьезофазы на 150°С (партия 7).
3) Показано, что способ брикетирования, обеспечивающий формирования более протяжённой реакционной зоны более предпочтителен для процесса синтеза данного материала, по сравнению со способом гранулирования.

Список литературы

1) Нестеров А.А. Панич А.А. Современные проблемы материаловедения керамических пьезоэлектрических материалов. Издательство Южного федерального университета. 2010. 226 с
2) Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. / Киёси Окадзаки; пер. с яп. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.

РОЛЬ ДОМЕННЫХ И ОРИЕНТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА НОВЫХ 2–2-КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА PMN–0,28PT

В.Ю. Тополов*,, К.Р. Бауэн***, А.В. Криворучко******

** Физический факультет Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

*** НКТБ «Пьезоприбор» Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

**** Центр исследования материалов, Механико-инженерный департамент, Университет Бата, BA2 7AY, г. Бат, Соединенное Королевство*

***** Донской государственный технический университет,г. Ростов-на-Дону, Россия*

Высокая эффективность пьезоактивных композитов на основе кристаллов релаксора-сегнетоэлектрика $(1 - x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - xPbTiO_3$ (PMN–*x*PT) представляет интерес для различных применений (сенсоры, актюаторы, гидрофоны и т.п.). Возможности улучшения эффективных параметров данных композитов связаны не только с выбором определенного состава кристалла PMN–*x*PT вблизи морфотропной границы, но и с оптимизацией ориентации его главных кристаллографических осей. Исследования ориентационных эффектов в композитах «кристалл PMN–*x*PT–полимер» со связностью 2–2 [1] свидетельствуют о значительном потенциале данных материалов и о возможностях варьирования их эффективных упругих, пьезо- и диэлектрических (т.е. электромеханических) свойств в широких интервалах.

В настоящей работе представлены результаты сравнительного исследования пьезоактивных 2–2-композитов с параллельным соединением слоев (рис.1) при $x = 0{,}28$. В настоящее время кристалл PMN–0,28PT является единственным среди перовскитовых

релаксоров-сегнетоэлектриков, для которых известны полные наборы электромеханических констант [2] в моно- и полидоменных состояниях при поляризации вдоль трех кристаллографических направлений. Кристаллические слои поляризуются вдоль одного из следующих кристаллографических направлений перовскитовой ячейки: [111] (монодоменное состояние, точечная группа симметрии 3*m*, вставка 1 на рис. 1), [001] (четыре типа доменов, макроскопическая симметрия 4*mm*, вставка 2 на рис. 1) и [011] (два типа доменов, макроскопическая симметрия *mm*2, вставка 3 на рис. 1). Полные наборы эффективных электромеханических констант исследуемых 2–2-композитов с регулярным распределением слоев (рис. 1) определяются в рамках матричного метода [1] при фиксированной ориентации главных кристаллографических осей внутри всех кристаллических слоев.

В работе показано, как ориентации не 180°-ных доменов в кристаллических слоях влияют на следующие гидростатические параметры 2–2-композитов «кристалл PMN–0.28PT – фторид поливинилидена»:

а) пьезокоэффициенты $d_h^* = d_{31}^* + d_{32}^* + d_{33}^*$, $g_h^* = g_{31}^* + g_{32}^* + g_{33}^*$ и $e_h^* = e_{31}^* + e_{32}^* + e_{33}^*$;

б) квадрат параметра приема $(Q_h^*)^2 = d_h^* g_h^*$;

в) коэффициент электромеханической связи $k_h^* = d_h^* / \sqrt{s_h^{*E} \varepsilon_{33}^{*\sigma}}$, где $s_h^{*E} = \sum_{a-1}^{3}\sum_{b=1}^{3} s_{ab}^{*E}$ – гидростатическая упругая податливость при напряженности электрического поля E= const, $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ – диэлектрическая проницаемость механически свободного композита.

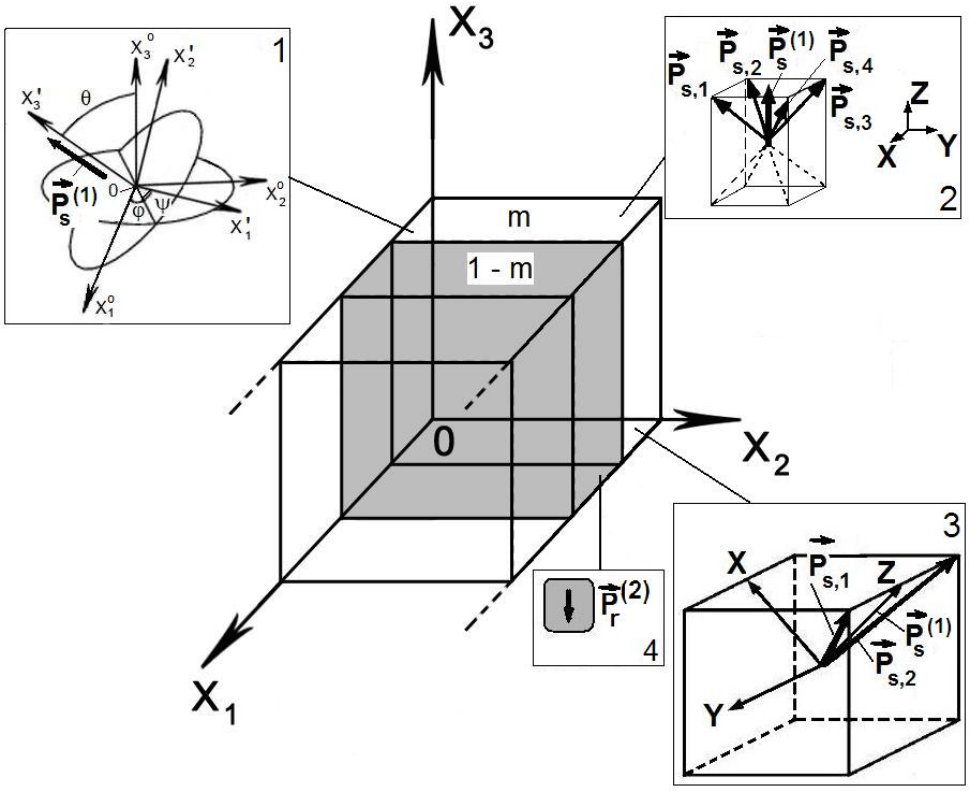
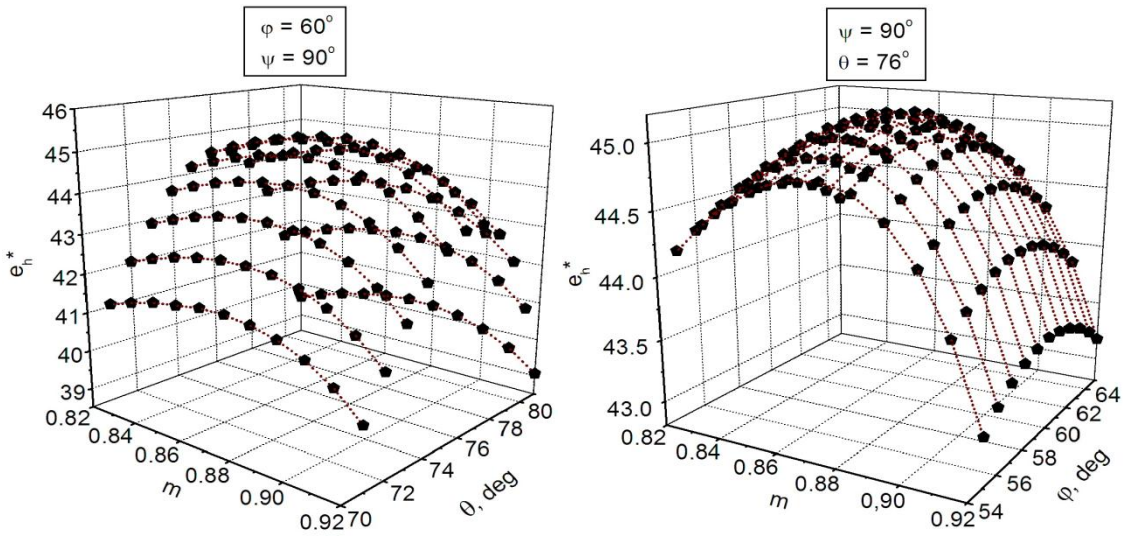


Рис.1. Схематическое изображение 2–2-композита «кристалл – полимер». ($X_1X_2X_3$) – прямоугольная система координат, *m* и 1 – *m* – объемные концентрации кристаллического и полимерного (выделен серым) компонентов соответственно, $\boldsymbol{P_s^{(1)}}$ и $\boldsymbol{P_r^{(2)}}$ – векторы спонтанной поляризации кристалла и остаточной поляризации полимера соответственно.

Таблица 1. Значения абсолютных максимумов гидростатических параметров Π_h* 2–2-композитов «кристалл PMN–0,28PT – фторид поливинилидена» для различных доменных состояний кристалла (вставки 1 – 3 на рис. 1) при комнатной температуре

Π_h*	Значения абсолютного maxΠ_h* (в скобках – оптимальная концентрация кристаллического компонента)		
	С кристаллом, поляризованным вдоль [111]	С кристаллом, поляризованным вдоль [001]	С кристаллом, поляризованным вдоль [011]
d_h^*	133 пКл / Н (0,238)	228 пКл / Н (0,253)	372 пКл / Н (0,337)
g_h^*	242 мВ·м / Н (0,007)	230 мВ·м / Н (0,007)	284 мВ·м / Н (0,012)
e_h^*	45,1 Кл / м^2 (0,868)	24,3 Кл / м^2 (0,811)	25,7 Кл / м^2 (0,876)
$(Q_h^*)^2$	12,3·10^{-12} Па$^{-1}$ (0,021)	15,3·10^{-12} Па$^{-1}$ (0,038)	33,8·10^{-12} Па$^{-1}$ (0,068)
k_h^*	0,217 (0,027)	0,235 (0,048)	0,361 (0,095)

Большие значения вышеуказанных гидростатических параметров (таблица 1) достигаются при определенных ориентациях главных кристаллографических осей и благодаря определенной анизотропии упругих и пьезоэлектрических свойств кристаллических слоев. Это положение в значительной мере относится к композитам с кристаллическими слоями, показанными на вставках 1 и 3 рис. 1. Особый интерес представляют значения $e_h^* \approx$(40…45) Кл/м^2 (рис. 2), достигающиеся в композите с монодоменными слоями PMN–0,28PT (вставка 1 на рис. 1) даже при отклонении углов Эйлера φ, ψ, θот оптимальных значений на 5…10° и при отклонении объемной концентрации этих слоев от оптимального значения примерно на 0,1. Для сравнения укажем, что монодоменный кристалл PMN–0,28PT, поляризованный вдоль [111], характеризуется значениями $e_h^{(1)}$ = –2,93 Кл / м^2 при $\varphi = \psi = \theta$ = 0°[2] и $e_h^{(1)}$ = –0,708 Кл / м^2 при φ = 60°, ψ = 90°, θ = 76°, а также отношениями упругих податливостей $s_{11}^{(1),E} / s_{13}^{(1),E}$ = –9,44 и $s_{33}^{(1),E} / s_{13}^{(1),E}$ = –6,80 при $\varphi = \psi = \theta$ = 0°[2]. Модули последних отношений значительно выше, чем для кристалла, поляризованного вдоль [001] или [011]. Значительная упругая анизотропия кристалла PMN–0,28PT, поляризованного вдоль [111], ведет к существенному перераспределению механических полей в композите и к благоприятному балансу вкладов пьезокоэффициентов e_{3j}^* в e_h^*. Значения e_h^* вблизи абсолютного максимума (см. 2-й столбец таблицы 1 и рис. 2) примерно в 3–4 раза выше, чем у сегнетопьезокерамик на основе Pb(Zr, Ti)O_3 [3].



а б

Рис.2. Поведение гидростатического пьезокоэффициента e_h^* (в Кл/м^2) 2–2-композита «кристалл PMN–0,28PT, поляризованный вдоль [111]–фторид поливинилидена» вблизи абсолютного $\max e_h^*(m, \varphi, \psi, \theta)$. Векторы $\boldsymbol{P_s}^{(1)}$ и $\boldsymbol{P_r}^{(2)}$ показаны соответственно на вставках 1 и 4 рис.1.

Полученные в работе результаты указывают на важную роль доменных и ориентационных эффектов в формировании комплекса эффективных гидростатических параметров 2–2-композитов на основе кристаллов PMN–0,28PT, а также на преимущества данных композитов по сравнению с традиционными [3] на основе сегнетопьезокерамик. Приведенные в таблице 1 параметры могут представлять интерес для пьезотехнических, гидрофонных и других применений новых композитов на основе кристаллов релаксора-сегнетоэлектрика с высокой пьезоактивностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы».

Список литературы

[1] TopolovV.Yu., KrivoruchkoA.V. // J. Appl. Phys.– 2009.– Vol.105,N7.– P.074105–7 p.

[2] Liu G., Jiang W., Zhu J., Cao W.//Appl.Phys.Lett.–2011.–Vol.99,N16.–P.162901–3p.

[3] Topolov V.Yu., Bowen C.R. Electromechanical properties in composites based on ferroelectrics. – London: Springer, 2009. – 202 p.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКИ ЦТС-19

А.А. Воронцов*, С.Е. Филиппов*, В.Ю. Тополов*,**

** НКТБ «Пьезоприбор» Южного федерального университета, 344090, Ростов-на-Дону, Россия*

*** Физический факультет Южного федерального университета, 344090, Ростов-на-Дону, Россия*

Пористые сегнетопьезокерамики (СПК) и родственные пьезоактивные композиты относятся к современным функциональным материалам и находят применения в пьезотехнике, гидроакустике и других областях. Взаимосвязь микроструктуры и

эффективных электромеханических (упругих, пьезо- и диэлектрических) свойств этих материалов исследовалась в ряде работ (см., например, [1, 2]). Пористые пьезоактивные материалы характеризуются относительно высокими значениями гидростатических пьезокоэффициентов $d_h^* = d_{33}^* + 2d_{31}^*$, $g_h^* = g_{33}^* + 2g_{31}^* = d_h^* / \varepsilon_{33}^{*\sigma}$, квадратов параметров приема $(Q_{33}^*)^2 = d_{33}^* g_{33}^* = (d_{33}^*)^2 / \varepsilon_{33}^{*\sigma}$, $(Q_h^*)^2 = d_h^* g_h^* = (d_h^*)^2 / \varepsilon_{33}^{*\sigma}$ и других эффективных параметров [2], где $\varepsilon_{33}^{*\sigma}$ – диэлектрическая проницаемость. В настоящем сообщении впервые рассматривается связь между фактором пьезоэлектрической анизотропии $\zeta_{d3j} = d_{33}^* / d_{31}^* = g_{33}^* / g_{31}^*$ и эффективными параметрами пористых композитов на основе СПК ЦТС-19.

Образцы пористых композитов изготовлены в НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ методом компрессионного прессования при давлении до $6 \cdot 10^7$ Па с последующим формированием пористого каркаса и спеканием определенных (в зависимости от заданной пористости m_p) количеств СПК компонента. В полученных образцах достигалась объемная концентрация пор примерно до $m_p = 0{,}60$.

Немонотонное поведение фактора анизотропии $\zeta_{d3j}(m_p)$ (рис. 1, а) может объясняться изменениями микроструктуры данных композитов. Такие изменения проявляются, например, при $m_p \approx 0{,}20$ и $m_p \approx 0{,}35$ и коррелируют с изменениями ряда эффективных параметров, связанных с продольным (рис. 1, б–г) и гидростатическим (рис. 1, д–ж) пьезоэлектрическим откликом композита. Менее заметны изменения эффективного коэффициента электромеханической связи $k_e(m_p)$ (рис. 1, з), связанного с планарной модой колебаний пьезоэлемента в форме тонкого диска и с пьезомодулем d_{31}^*. Существенное изменение фактора анизотропии $\zeta_{d3j}(m_p)$ в интервале $0{,}5 < m_p < 0{,}6$ (рис. 1, а) обусловлено главным образом изменениями пьезомодуля d_{31}^* и коррелирует с изменениями гидростатических параметров (рис.1,д–ж). Аналогичный вид кривых $g_{33}^*(m_p)$ и $[Q_{33}^*(m_p)]^2$ (ср. рис. 1, в и г), а также кривых $g_h^*(m_p)$ и $[Q_h^*(m_p)]^2$ (ср. рис. 1, е и ж) наблюдается при условии слабого изменения $d_{33}^*(m_p)$ в широком интервале m_p. Корреляция между $\zeta_{d3j}(m_p)$ и $d_h^*(m_p)$ (ср. рис. 1, а и д) не имеет аналогов в литературе и свидетельствует в пользу важной роли микроструктуры (ее изменений) в формировании анизотропного пьезоэлектрического отклика исследуемых композитов. Интерпретация зависимостей эффективных параметров от m_p проводится в рамках модели пьезоактивного композита [2] с элементами связности 1–3 и 2–2. Из сравнения расчетных и экспериментальных значений параметров следует, что элементы связности 1–3 (колонарная структура отдельных областей композита, наличие фрагментов в форме СПК стержней, ориентированных преимущественно вдоль оси поляризации OX_3) играют доминирующую роль в формировании пьезоэлектрической анизотропии и гидростатического отклика пористых композитов на основе СПК ЦТС-19.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

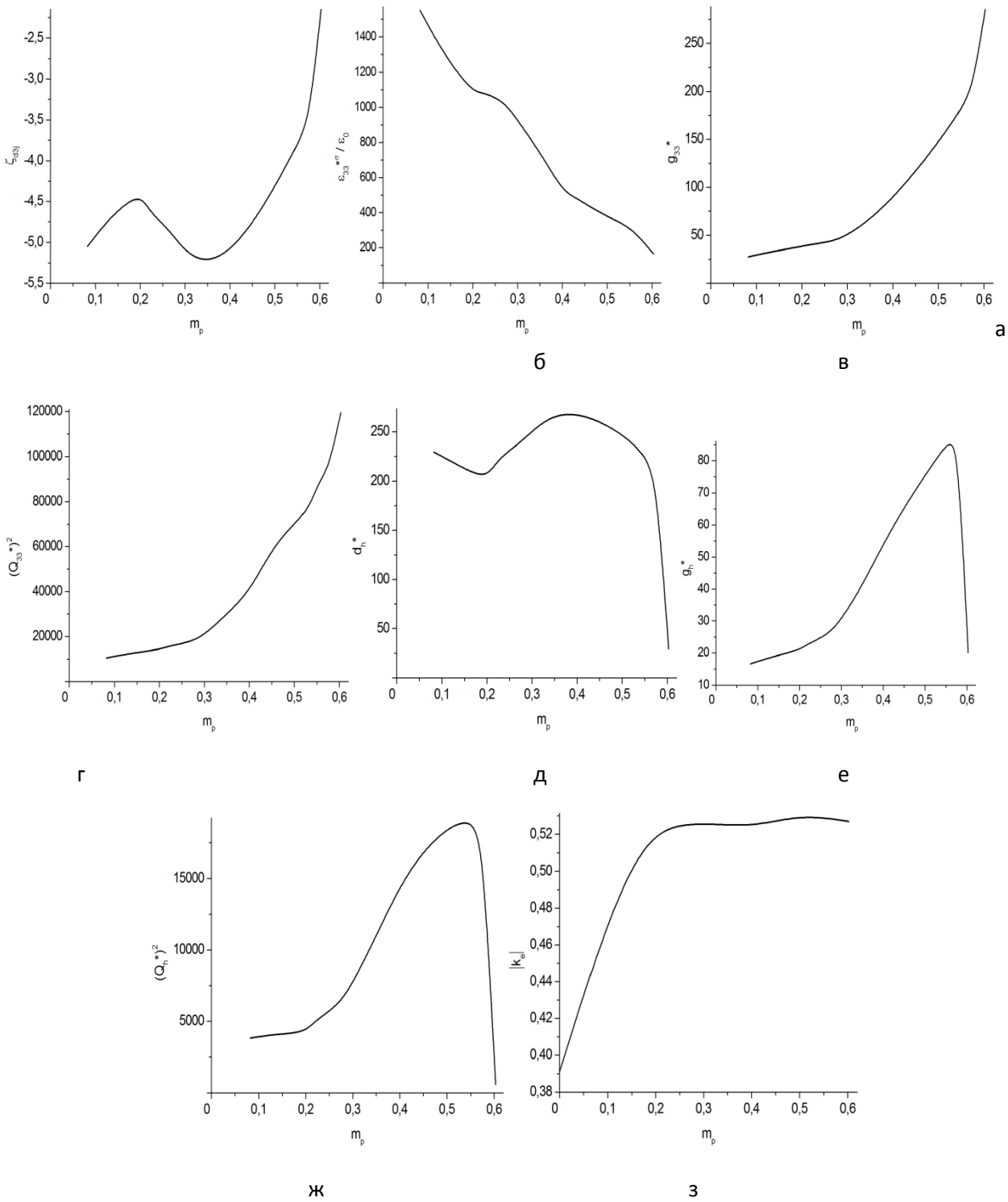


Рис. 1 – Экспериментальные зависимости эффективных параметров композита на основе СПК ЦТС-19 от пористости m_p при комнатной температуре.

Список литературы

[1] Kara H., Ramesh R., Stevens R., Bowen C.R. // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., a. Freq. Control.– 2003.– Vol. 50, N 3.– P.289–296.

[2] Topolov V.Yu., Bowen C.R.Electromechanical properties in composites based on ferroelectrics.– London: Springer, 2009. – 202 p.

ВОЗМОЖНОСТЬ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

Панич А.А., Карюков Е.В,.Свирская С.Н, Скрылев А.В.,Малыхин А.Ю.

Южный федеральный университет, НКТБ «Пьезоприбор»

Активное использование пьезокерамики в различных областях науки и техники началось в 50–60 годах XX века, однакосвойства, присущие пьезокерамике, до сих пор изучены и востребованы не в полной мере. В настоящее время изделия из пьезокерамики широко используются в медицине, авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефтегазовом комплексе; силовая пьезокерамика - в ультразвуковой сварке, чистке поверхностей, нанесении покрытий, сверлении и т. д.

Современные требования по энергосбережению, миниатюризации, адаптивности к компьютерным системам управления и контроля все чаще заставляют производителей техники и оборудования обращаться к производителям пьезокерамики с целью совместного поиска тех или иных технологических решений[1]. Область применения пьезокерамических материалов постоянно расширяется, меняются условия их применения. Возрастают и требования, предъявляемые к пьезоматериалам и изделиям на их основе. Актуальным остается вопрос температурной зависимости электрофизических параметров пьезокерамических материалов.

В данный момент на рынке представлено большое количество пьезокерамических материалов отечественного и зарубежного производства. В открытом доступе можно найти основные электрофизические параметры (ЭФП) таких материалов, измеренные при стандартных условиях.Но найти данные по изменению этих параметров в зависимости от температуры представляется довольно сложной задачей.

Существует ряд методик проведения таких измерений [2,3].Эти методики позволяют проводить измерение какого-то одного выбранного параметра, и являются крайне неудобными с точки зрения использования оборудования и временных затрат. В данной работе была предпринята попытка комплексного изучения температурной зависимости ЭФП пьезокерамических материалов. Подобные измерения были выполнены на базе измерительного стенда «Цензурка-М» и малогабаритной термокамеры.

Измерительный стенд «Цензурка-М» позволяет одновременно измерять и рассчитывать целый комплекс параметров: значения резонансной и антирезонансной частот, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, продольного пьезомодуля, скорости звука, добротности, относительной диэлектрической проницаемости, эффективного коэффициента электромеханической связи и удельного объёмного электрического сопротивления.

Температурный диапазон измерений от –40 до +80°Свозможно обеспечить с использованием малогабаритной термокамеры TIRAminiTTC 4002, позволяющей контролировать температуру в момент измерения с точностью ±1°С. Для фиксации измеряемых пьезоэлементов был изготовлен держатель, позволяющий удерживатьэлементы как стандартного размера диаметром 10мм и толщиной 1мм, так и значительно более крупные образцы – до 40 мм высотой и 70 мм диаметром (рис.1).

Для проведения измерений держатель подключался проводами к измерительному стенду «Цензурка-М», сам же вместе с измеряемым образцом располагался в термокамере. Для предотвращения возможного обледенениязамеряемых пьезоэлементов, в камеру закладывали заранее просушенныйсиликагель.Указанное аппаратурное оформление позволяет одновременно изучать температурную зависимость вышеуказанного комплекса параметров.

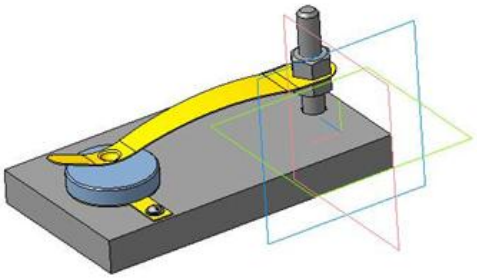


Рис. 1. Эскиз держателя пьезокерамических элементов, применяемых в камере TIRAminiTTC 4002.

В настоящей работе приведены, в качестве примера, значения статической емкостиC и продольного пьезомодуляd_{33} в интервале температур от минус 40 до плюс 80, измеренные вышеуказанным способом.

Измерения электрофизических параметров в указанном интервале температур позволили определить их обратимые изменения.

Обратимыеизменения относительной диэлектрической проницаемости $\Delta\,\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}}/\varepsilon_0$ в интервале температур от 20°С до–40°С и от 20°С до +80°С определяли по формуле:

$$\Delta(\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}}/\varepsilon_0)_{об} = \frac{|C_{20} - C_x|}{C_{20}} \cdot 10^2$$

где C_{20} и C_xзначения статической ёмкости при 20°С и заданной температуре x соответственно.

Обратимые изменениепродольного пьезомодуляd_{33}в интервале температур от 20°С до–40°С и от 20°С до +80°С аналогичноопределяли по формуле:

$$\Delta d_{33} = \frac{(d_{33})_{20} - (d_{33})_x}{(d_{33})_{20}}.$$

где $(d_{33})_{20}$и$(d_{33})_x$ значения продольного пьезомодуля, измеренного динамическим методом при 20°С и заданной температуре xсоответственно.

Измерения при различных температурах статической емкости и продольного пьезомодулябыли выполнены на образцах диаметром 10 мм и толщиной 1 мм, изготовленных из материала ЦТБС-3(таблица 1). Значения относительной диэлектрической проницаемости - рассчитаны по формуле:

$$\varepsilon_{33}^{\mathrm{T}}/\varepsilon_0 = \frac{0{,}144 \cdot C_0 \cdot h}{\varnothing^2}$$

где h – толщина пьезоэлемента, м,

∅ - диаметр электрода, м,

C_0 - статическая электрическая емкость пьезоэлемента , пФ.

Используя значения резонансной и антирезонансных частот при различных температурах можно оценить поведение параметров пьезокерамики, рассчитываемых по формулам, включающих F_rи F_a.

Таблица 1– ЭФП пьезокерамического материала ЦТБС-3 при температурах от минус 40 до плюс 80°С.

Темп-ра °С	Ёмкость C_t, пФ	$\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$	d_{33}, рКл/Н	F_r, кГц	F_a, кГц
-40	1372,0	2055,4	262	244,62	263,85
-30	1421,5	2129,5	270	243,89	262,79
-20	1491,0	2233,6	278	243,21	261,74
-10	1540,5	2307,8	288	242,90	261,57
0	1582,0	2370,0	297	242,81	261,20
10	1631,5	2444,1	304	242,75	261,02
20	**1681,5**	**2519,0**	320	**242,92**	**261,22**
30	1765,5	2644,9	336	242,80	260,55
40	1834,0	2747,5	352	242,73	260,34
50	1903,5	2851,6	364	242,79	260,09
60	1984,5	2972,9	374	242,88	259,30
70	2082,5	3119,8	398	242,98	259,44
80	2200,0	3295,8	442	242,92	258,86

На рис. 2 представлены обратимые уходы в % относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$и продольного пьезомодуля d_{33} материала ЦТБС-3 в исследованном диапазоне температур.

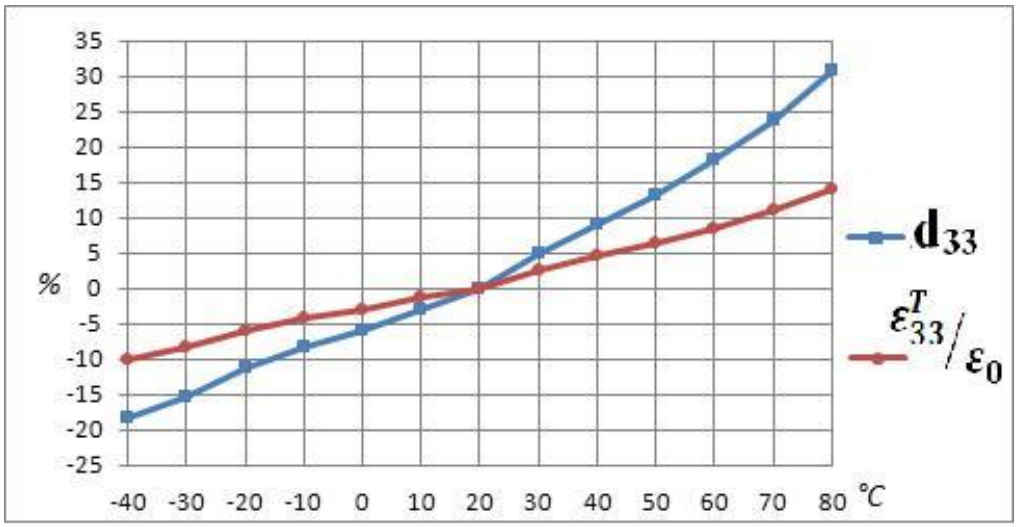


Рис. 2 . Обратимые уходы пьезомодуля d_{33} и относительной диэлектрической проницаемости$\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$для пьезоматериала ЦТБС-3в интервале температур –40°С – +80°С.

Полученные результаты согласуются с обратимыми уходами, характерными для материала ЦТБС-3, измеренными ранее в соответствии с ГОСТ 12370-60. Таким образом,

апробированныйметод изучения ЭФП пьезокерамических материалов с использованием термокамеры и стенда «Цензурка М»позволяет оперативно изучать поведение целого комплекса параметров в зависимости от температуры и помочь определить температурные уходы.

Список литературы

1. С. Жуков. О пьезокерамике и перспективах ее применения. Электронный ресурс.
2. ГОСТ 12370-80. Материалы пьезокерамические. Методы испытаний. М. Издательство стандартов, 1980.
3. В.Л. Земляков. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении. Том V. Изд. ЮФУ. 2009

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛА С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СПЕКАНИЯ

В.А.Мараховский, М.А.Мараховский, С.Н.Свирская

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г.Ростов-на-Дону

В работе исследовано влияние легирующих добавок и технологических процессов на свойства пьезокерамического материала ЛС-49 (система ЦТС легированная добавками).

Пьезоматериал ЛС-49 был получен традиционным методом твердофазных реакций. С целью исследования влияния легирующих добавок на свойства пьезоматериала было приготовлено 2 партии материала:

1. Пьезоматериал ЛС-49 с добавлением 1% масс легирующей добавки;
2. Пьезоматериал ЛС-49 с добавлением 2% масс легирующей добавки.

Из материала были отпрессованы диски диаметром 12 мм и высотой 3 мм. После этого производилось спекание прессовок при температурах от 960°С – до 1150°С. Спекания до температуры 1000°С осуществлялись по низкоскоростному режиму с длительной выдержкой, а спекания свыше 1000°С - по традиционному режиму спекания со скоростью нагрева печи 200°С/час. Заготовки спекались в печи NabertherrmGmbH (L5/13/B180). Спечённые керамические образцы подвергались механической обработке, до заданных размеров (диаметр 10 мм, высота 1 мм). На керамические диски наносились электроды путём вжигания серебряной пасты. После этого образцы поляризовались при охлаждении через точку Кюри и приложении электрического поля напряженностью 1 кВ/см. Зависимость свойств пьезокерамического материала ЛС-49 от температуры спекания и количества легирующих добавок представлена на рис. 1. Полученные результаты свидетельствуют, что параметры пьезокерамического материала ЛС-49 меняются незначительно в широком диапазоне температур (от 960°С до 1075°С).

В настоящей работе исследовано влияние механической активации на пьезоматериал ЛС-49 с 1% масс легирующей добавки. Механическая активация (помол) проводилась в барабанной мельнице и в планетарной мельнице. Механическая активация в планетарной мельнице высокоэнергетичного помола PlanetaryMillpulverisette 5 FritschGmbH значительно выше, чем в барабанной мельнице. Критерием степени механической активации служили размеры частиц материала. Размер частиц шихты материала ЛС-49 определялся с помощью гистограмм, полученных на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 compact. В результате оптимальный режим механической активации активации материала составил 2 часа помола при частоте вращения мельницы 400 об/мин. Механическая активация проводилась до синтеза и после синтеза материала ЛС-49. Спекание материала проводилось при температуре 980°С с медленным нагревом и медленным охлаждением.

Электрофизические параметры пьезоматериала ЛС-49, полученные в результате исследований, представлены в таблице 1.

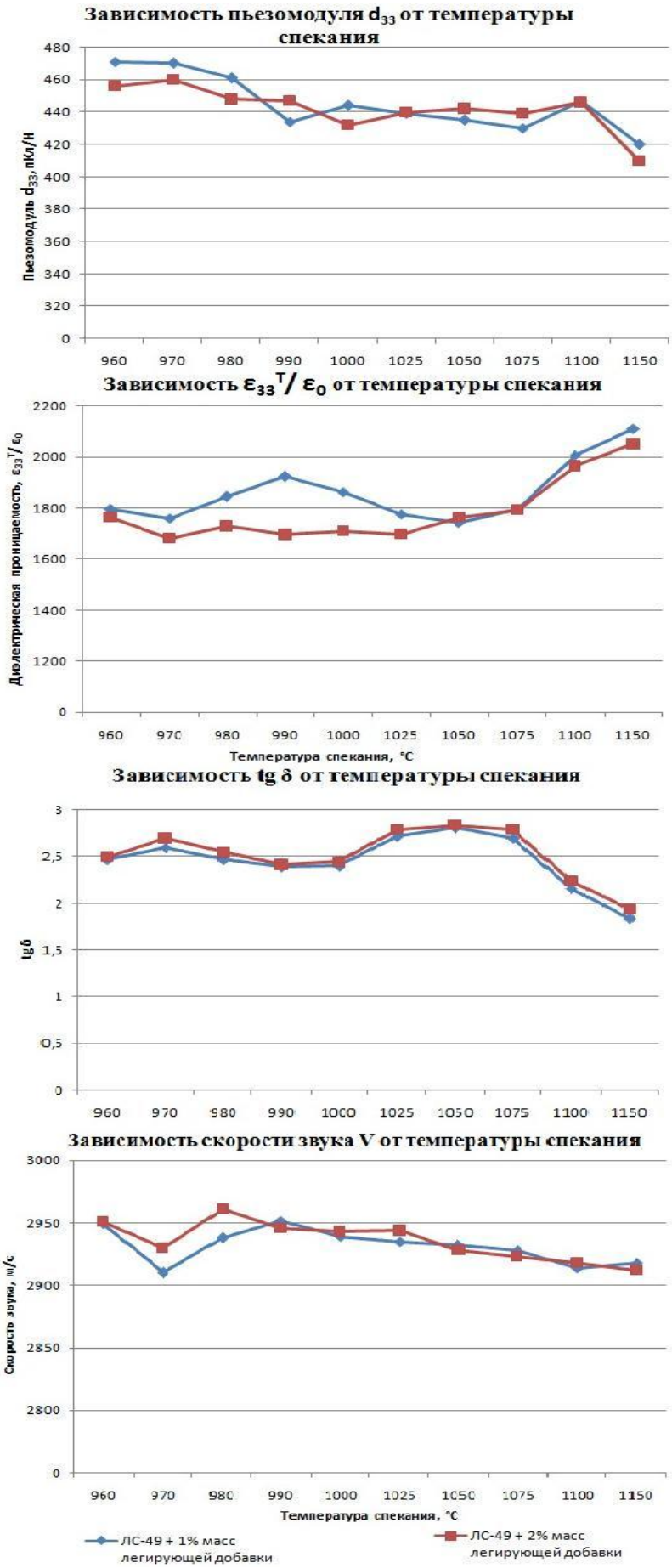


Рис.1. Зависимость свойств материала ЛС-49 от температуры спекания

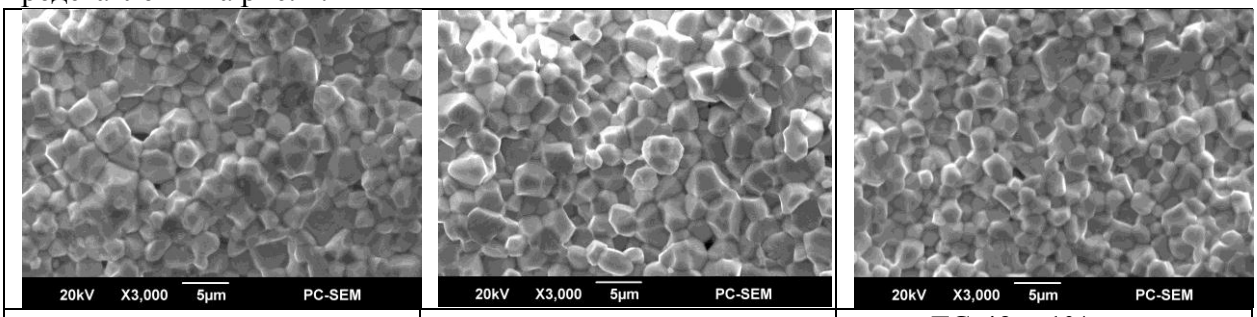
Таблица 1 Электрофизические параметры пьезокерамического материала ЛС-49

№ партии	tgδ	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	d_{33}, пКл/Н	$V_{звука}$, м/с	ρ, г/см^3
ЛС-49 + 1% масс добавки	2,47	1844	461	2938	7,51
ЛС-49 + 2% масс добавки	2,55	1729	448	2961	7,48
ЛС-49 мех.активирован в планетарной мельнице	3,4	1853	512	2847	7,54

Из таблицы видно, что использование 1% масс легирующей добавки в пьезоматериале ЛС-49 способствует получению более высоких параметров, в отличие от 2% масс добавки.

Механическая активация в планетарной мельнице приводит к улучшению электрофизических характеристик, в сравнении с неактивированными партиями пьезоматериала ЛС-49. Повышенные свойства пьезоматериала объясняются, по-видимому, более высокой дефектностью структуры материала в результате высокоэнергетического помола в планетарной мельнице.

Микроструктура керамических образцов исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа JEOL. Снимки микроструктуры керамических образцов ЛС-49 представлены на рис. 2.



ЛС-49 + 1% масс легирующей добавки	ЛС-49 + 2% масс легирующей добавки	ЛС-49 + 1% масс легирующей добавки (механически активированный)

Рис. 2. Микроструктура пьезокерамики ЛС-49

Во всех случаях пьезокерамические образцы ЛС-49 имели однородную структуру без крупных агломератов. Отличием является получение более мелкого зерна после механической актвации в планетарной мельнице (средний размер зерна не более 3 мкм), по сравнению с активацией в барабанной мельнице (средний размер зерна не более 5 мкм).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

Легирующие добавки позволяют проводить спекание материала ЛС-49 в широком диапазоне температур (960 - 1100°С) при стабильно высоких показателях электрофизических параметров. Механическая активация пьезокерамического материала ЛС-49 с добавлением 1% масс легирующей фазы позволяет получать максимально высокие для данного типа материала свойства. Возможно спекание пьезоэлементов при низких температурах диапазона спекания и высоких характеристиках позволяет изготавливать многослойные пьезоэлементы с электродами из серебряно-палладиевой пасты ПП-8. Это, в свою очередь, позволяет снизить стоимость многослойных пьезокерамических элементов.

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОМОЛА

В.В. Еремкин, А.В. Нагаенко, А.А. Панич, В.Г. Смотраков

НКТБ «Пьезоприбор» Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону

При производстве пьезокерамики желательно достижение максимальной плотности и однородного распределения зерна по размеру, за исключением тех случаев, когда высокая пористость является одним из основных требований, предъявляемых к технической керамике. Как правило, необходим минимальный средний размер зерна, обеспечивающий высокую механическую и диэлектрическую прочность, однако для пьезоэлектрических керамик характерна прямо пропорциональная зависимость пьезоэлектрических модулей от размера зерна. Поскольку возникающие на стадиях приготовления порошка и формовки заготовок дефекты, как правило, не устраняются, а лишь усиливаются на стадии спекания, микроструктура керамики, во многом определяющая ее свойства, задается на этих этапах. Высокодисперсные, химически однородные порошки могут быть получены методом химического соосаждения, либо твердофазным синтезом с применением высокоэнергетического помола. Первый метод требует дорогостоящего сырья, и применим к относительно простым по химической композиции материалам. При втором методе используются традиционные для керамического производства реактивы.

В работе исследовано влияние механической активации в планетарной мельнице на условия синтеза, спекания, микроструктуру и основные свойства сегнетомягких пьезокерамических материалов: $Pb_{0.975}Ca_{0.01}Ba_{0.01}Sr_{0.005}(Ti_{0.48}Zr_{0.52})O_3$ + 1.4 % вес. Bi_2O_3 (ЦТС-83) и $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ + 1 % вес.Nb_2O_5 (ЦТС-19). Материалы имеют относительно простые химические композиции, незначительно отличающиеся от состава двухкомпонентной системы твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС) в окрестности морфотропной фазовой границы (МФГ), поэтому полученные результаты могут быть распространены на обширный класс пьезокерамик.

Известно, что при твердофазном синтезе ЦТС, состав которого соответствует МФГ, первоначально формируются фазы удаленные от нее. Повышение температуры синтеза сопровождается взаимным растворением этих фаз, причем скорость гомогенизации твердого раствора зависит от реакционной способности исходных веществ, наличия модифицирующих добавок и режимов механической обработки. В случае ЦТС-83, кратковременный помол (2 ч) исходной шихты в планетарной мельнице позволяет снизить температуру синтеза до 800 ^{0}С. При твердофазном синтезе ЦТС-19 из простых оксидов реакция проходит полностью лишь при механической активации шихты и в две стадии (800 + 900 ^{0}С). Температура синтеза ЦТС-83 и ЦТС-19 может быть снижена до 750 ^{0}С при использовании прекурсора, представляющего собой твердый раствор, содержащий все элементы, входящие в позицию В перовскитовой решетки.

Для порошков ЦТС-83 можно выделить два типа агломератов. Наиболее крупные (от 5 до 45 мкм), по-видимому, формируются из-за наличия жидкой фазы, связанной с избыточным количеством низкоплавкого модификатора Bi_2O_3. Их концентрация снижается до нуля при температуре синтеза 750 ^{0}С. Второй тип агломератов со средним размером от 1.5 до 3 мкм может быть связан с процессами рекристаллизации при синтезе. Из-за относительно крупного размера первичных частиц прекурсора, полученного твердофазным синтезом, средний размер агломерата второго типа при использовании прекурсора несколько выше, несмотря на более низкую температуру синтеза. Это справедливо и для порошков ЦТС-19, в которых крупные агломераты отсутствуют вообще. Кратковременная (2 ч) обработка порошков в планетарной мельнице позволяет полностью разрушить крупные агломераты и уменьшить размер агломератов второго типа.

Установлено, что для получения высокоплотной керамики в диапазоне температур спекания от 1000 до 1250 ^{0}С необходимо одновременное выполнение двух условий: полноты синтеза и среднего размера агломерата в диапазоне от 1 до 1.5 мкм. Применение более тонких порошков не приводит к увеличению плотности керамики или снижению температуры ее спекания, однако активизирует испарение оксида свинца из образцов в процессе нагрева до температуры спекания. Из-за особенностей химической композиции в керамике ЦТС-19 этот эффект более заметен.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ И СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ, МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ ЗАДАЧ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

С.Н. Галий, В.К. Доля

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Проектирование АР наукоемкий, технологически сложный и много итерационный процесс, при котором приходится решать массу сложных задач, таких как выбор конструкционных материалов для составных частей АР, создание технологии сборки, проведение испытаний и т.д. Одной из основных проблем при разработке АР является поиск оптимального решения двух взаимосвязанных вопросов: обеспечение оптимальных геометрических размеров элементов и выбор технологии их изготовления. В настоящее время применяют следующие подходы для решения данных проблем.

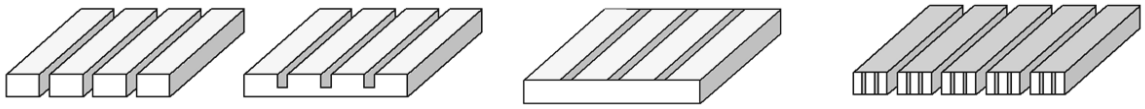
Для решения выше обозначенной проблемы, введено понятие «Идеальный элемент АР» к параметрам и свойствам которого, необходимо стремиться при разработке элемента АР. «Идеальный элемент АР» должен обладать следующими характеристиками:

— круговая диаграмма направленности (элемент АР излучает цилиндрическую акустическую волну), отсутствие боковых лепестков на диаграмме направленности;
— поршнеобразные колебания в полосе пропускания;
— большой коэффициент двойного преобразования, т.к. АР работает в совмещённом режиме;
— широкая полоса пропускания, необходимая для излучения и приема коротких УЗ эхо-сигналов.

Проведя оценку возможных областей применения АР и учитывая потребности рынка неразрушающего контроля, была выбрана для разработки линейная 16 элементная АР со следующими параметрами центральная частота 5 МГц, полоса не менее 70%, сектор сканирования не менее ±40°, коэффициент преобразования -40 дБ)

Поскольку, разрабатываемая АР, является высокочастотным устройством, функционирующим в коротковолновой области ($\lambda \approx 1$ мм), размеры элемента становятся соизмеримы с длиной волны. Это приводит к необходимости решения достаточно сложной задачи колебаний возникающих в АР, что аналитическими методами практически не осуществимо. Поэтому задача выбора типа элемента АР и его оптимальных геометрических размеров решалась методами математического моделирования.

Выполнение второго условия «идеального элемента АР», при применении пьезоэлектрических преобразователей, в полной мере невозможно. Колебания пьезоэлектрического элемента в данном случае носят более сложный характер из-за соизмеримости геометрических размеров ($0{,}125\lambda < b < 0{,}61\lambda; a \approx 0{,}5\lambda$). Построено 5 типов моделей чувствительного элемента АР (рис.1) для проведения расчетов в частотной и временной области. В качестве среды излучения был использован материал по своим механическим характеристикам аналогичный ЦТС-19, но не обладающий пьезоэлектрическими свойствами.



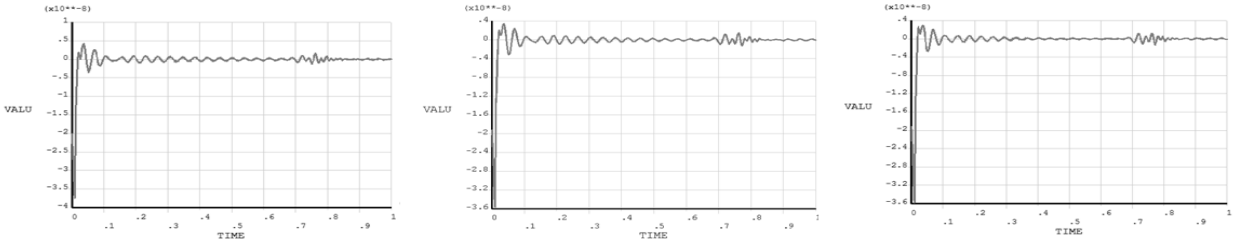
а б в г

Рис.1. Модели чувствительного элемента АР (а – модель №1; б – модель №2,3; в – модель №4; г – модель №5)

При проведении моделирования во временной области, на элемент №1 АР подавался импульс возбуждения -1В, 100 нс. Элементы АР №2…5 и элемент №1, после окончания импульса возбуждения, находились в режиме короткого замыкания. Производился расчёт изменения заряда на элементах АР, а так же возникающих деформации и напряжений во всей конструкции модели. Затем выполнялась оценка следующих параметров: коэффициент перекрестной связи(K_c), коэффициент двойного преобразования (K_{II}), форма колебаний элемента АР, создаваемая УЗ волна, параметры сигнала при переходном процессе и эхо-сигнала.

Моделирование конструкций АР в частотной области включало в себя расчет зависимостей модуля, активной и реактивной составляющей полного электрического сопротивления. По данным характеристикам оценивалась полоса пропускания элемента АР и наличие паразитных резонансов.

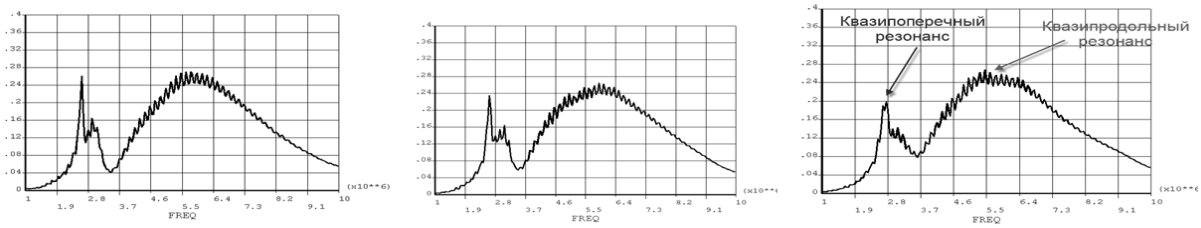
Модель №1,2,3 представляет собой АР выполненную из пьезоэлектрической пластины, в которой формирование элементов выполнялось путем нанесения параллельных пропилов на глубину а, 0,8а, 0,6а для моделей 1, 2, 3 соответственно. Как показали результаты моделирования, данные типы конструкций обладают длительными переходными процессами (рис.2) обусловленные наличием квазипоперечной модой колебаний элемента АР.



А б в

Рис.2. Осциллограмма изменения заряда на элементе АР №1 (а – модель №1; б – модель №2; в – модель №3)

Данный факт подтверждается наличием высокодобротного ($Q_M \approx 5 \ldots 15$) резонанса на частоте 2,8 МГц (рис.3).



А б в

Рис.3. Графики зависимости активной проводимости элемента АР (а – модель №1; б – модель №2; в – модель №3)

Необходимо отметить, что добротность данного резонанса падает по мере уменьшения глубины пропила. Можно предположить, что для крайнего случая (при

отсутствии пропилов), высокочастотный квазипоперечный резонанс исчезнет. Для проверки данной гипотезы была построена модель №4. Как показал результат расчета (рисунок 5), элемент АР действительно возбуждается только на частоте соответствующей высокочастотному продольному резонансу пьезоэлектрической пластины. При этом наблюдается короткий переходной процесс (рис.4). В свою очередь модель №4, имеет самый большой из всех моделей K_C= - 16,6 дБ (таблица 1), что вполне логично и объясняется наличием сильной механической и электрической связи между элементами. Наличие столь сильной связи между элементами АР приводит к возбуждению соседних элементов АР, что в свою очередь влечет существенное сужение диаграммы направленности элемента АР, появлению противофазных участков и малому коэффициенту преобразования.

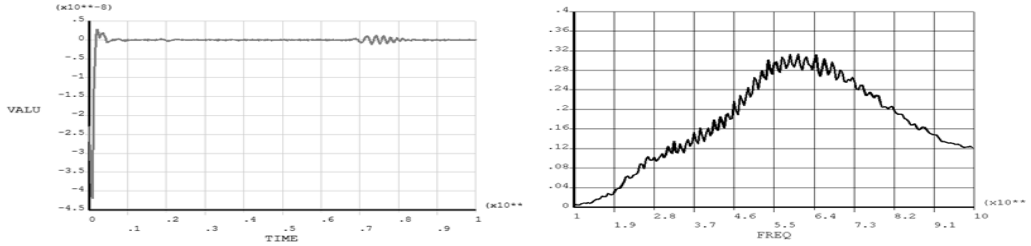


Рис.4. Осциллограмма изменения заряда и график зависимости активной проводимости элемента АР макет №4

Таблица 1 – Результатымоделирования

Модель	$K_П$, дБ	K_C, дБ	$t_{ПП}$, мкс	$t_{ЭС}$, мкс	$f_Ц$, МГц	$Q_М$
№1	- 23,0	- 31,2	5,2	1,1	5,5	11
№2	- 22,5	- 28,5	4,1	1,1	5,5	9
№3	- 22,5	- 26,0	3,2	1,1	5,5	8
№4	- 25,1	- 16,6	0,5	1,1	5,7	8
№5	- 21,2	- 38,4	0.3	1.1	5,5	1,5

Модель № 5 принципиально отличается от моделей №1…4 тем, что элемент АР образован из 3-х подэлементов механически не связанных, но имеющих общие электроды. Предварительно, для определения оптимальных размеров была построена модель одиночного элемента, в котором варьировалась соотношение размеров a/b, критерием выбора служила частота резонанса и коэффициент электромеханической связи. Было установлено, что оптимальным размером подэлемента для частоты 5 МГц является a=0,29 мм b=0,2 мм. Основываясь на этих данных, была построена модель №5. Как показал результат расчета (рис.5) элемент АР имеет ярко выраженные продольные колебания, короткий переходной процесс, самый большой $K_П$ и малый K_C. Также данный тип элемента АР обладает квазипоперечным резонансом на частоте 9,1 МГц, который практически не оказывает ни какого влияния на основные технические характеристики элемента АР и может быть отфильтрован в СНК.

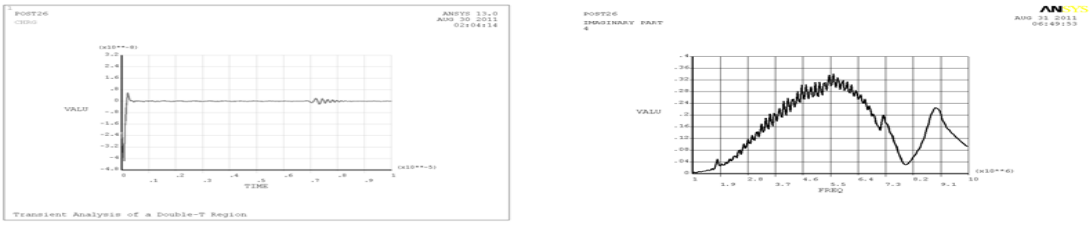


Рис.5. Осциллограмма изменения заряда и график зависимости активной проводимости элемента АР макет №5

По результатам моделирования были изготовлены макеты модулей АР состоящие из протектора и пьезоэлектрического элемента,на который были нанесены пропилы.

Как показали результаты измерения (рис. 6,7), изготовленные образцы обладают теми же свойствами что и их аналоги – математические модели, с поправкой, обусловленной наличием протектора.

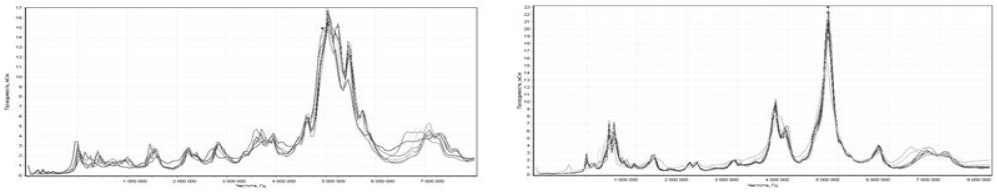


Рис.6.График зависимости активной проводимости подэлементов модуля АР (а – АР изготовленная по модели №5; б – АР изготовленная по модели №2)

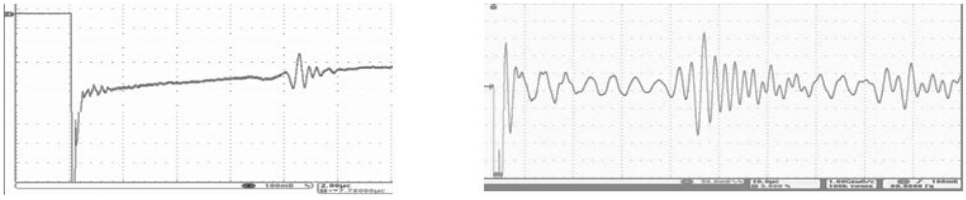


Рис.7. Осциллограмма изменения заряда подэлементов модуля АР (а – АР изготовленная по модели №5; б – АР изготовленная по модели №2)

Вывод. В результате проделанной работы, было проанализировано 5 типов конструкций подэлементов АР, выбрана конструкция и определены его оптимальные геометрические размеры обеспечивающие выполнение поставленной задачи.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ГАЗА

М.В. Богуш, Э.М. Пикалев, С.А. Толмачев

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ

Ультразвуковые расходомеры жидких и газообразных сред основаны на измерении параметров акустических эффектов при прохождении ультразвуковых колебаний через движущийся поток жидкости или газа [1]. Ультразвуковые расходомеры жидкости выпускаются промышленностью уже более 50 лет [2], однако, освоение ультразвуковых расходомеров газа ведется в течение последнего десятилетия.

Среди ультразвуковых методов измерения объемного расхода можно выделить основных три метода: доплеровский, время-импульсный и корреляционный методы. Метод измерения выбирается в зависимости от типа контролируемой среды.

Важнейшим функциональным узлом ультразвуковых расходомеров являются излучатели-приемники (преобразователи) ультразвуковых волн, характеризующие многие эксплуатационные возможности и технический уровень приборов. Излучатели-приемники чаще всего выполняются на основе пьезокерамических элементов.

Для измерения расхода однофазных (гомогенных) сред лучше всего подходит время-импульсный метод измерения. Этот принцип основан на посылке в акустический канал расходомера ультразвуковых сигналов по потоку и против него, что позволяет исключить из измерения зависимость скорости звука от давления, температуры и физико-

химических свойств среды. В этом случаем определение объемного расхода сводится к уравнению вида:

$$G = s \cdot (\frac{3.14 \cdot D^2}{4}) \cdot (T_{противпотока} - T_{попотоку}), \quad (1)$$

где s – коэффициент пропорциональности; D – диаметр трубопровода; $T_{противпотока}$ – время распространения импульса сигнала против потока; $T_{попотоку}$ – время распространения импульса ультразвукового сигнала по потоку.

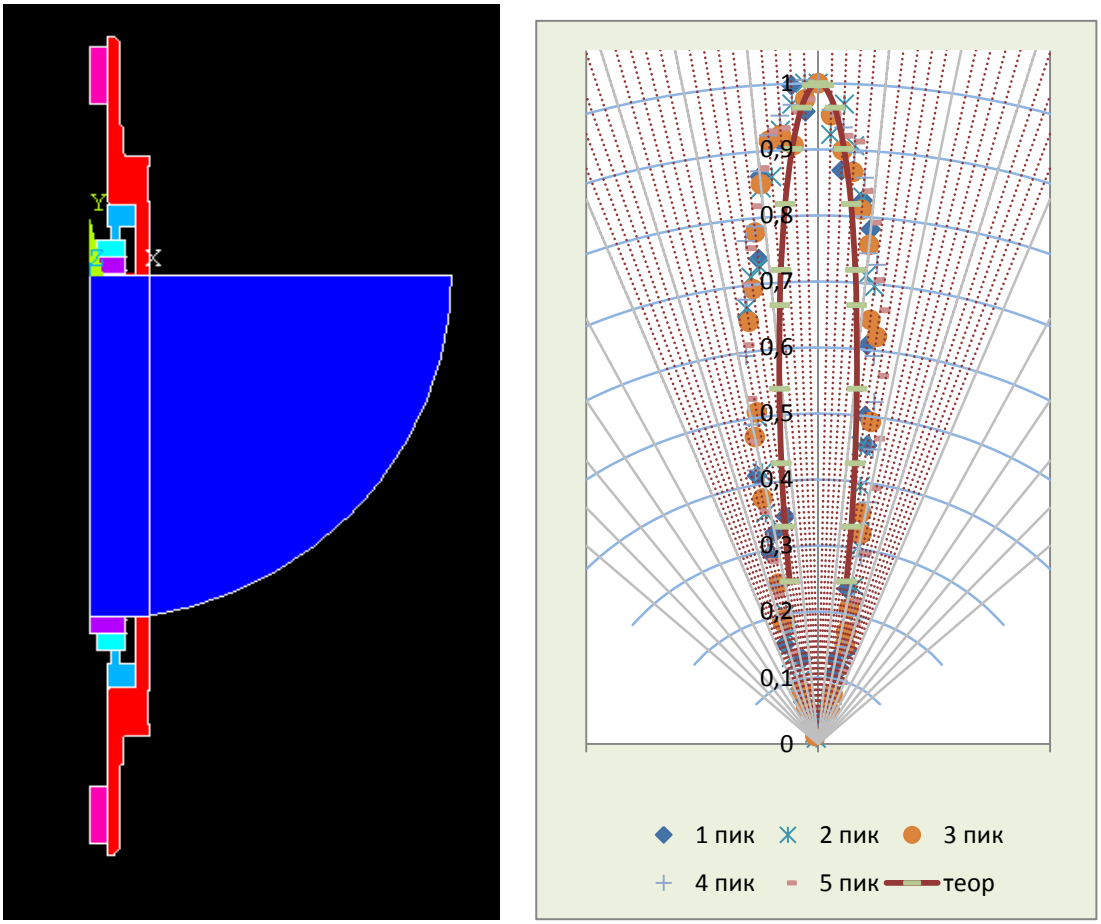
Данный метод обладает высокой точностью измерения и возможностью обеспечения высокого быстродействия расходомеров (время "реакции" на изменения расхода). Недостатком метода является ограничение максимальной скорости измеряемого потока, определяемой из максимально возможного угла сноса излучения при фиксированном расстоянии между преобразователями.

В настоящее время актуальна проблема увеличения диапазона измеряемых скоростей потока допустимых при измерении расхода время-импульсным методом. Очевидным решением описанной проблемы является расширение потока излучаемой энергии.

Целью настоящей работы является анализ диаграммы направленности пьезоэлектрических преобразователей (ПП) акустических волн в газовой среде, описание теоретических и экспериментальных результатов, а также поиск решений по улучшению технических характеристик ультразвуковых преобразователей. Под диаграммой направленности понимается диаграмма распределения мощности излучения относительно оси симметрии ПП, а ширина диаграммы направленности – это суммарный максимальный угол относительно оси симметрии ПП, при котором амплитуда принимаемого излучения уменьшается в два раза. Исследование диаграммы направленности проводилось на основе ПП 224М, производства ООО «Пьезоэлектрик».

Теоретический анализ модели из двух идентичных ПП, установленных соосно на расстоянии между мембранами 300 мм и разделенных газовой средой, проводился на основе применения метода конечных элементов в рамках программного пакета ANSYS [3], так как аналитические методы для ПП неприменимы. Результаты рассчитывались для работы преобразователей в режиме излучения-приема акустического импульса. Геометрическая модель пары излучатель-приемник состоит из излучателя (вверху) и приемника (внизу) расположенных соосно и направленных навстречу друг другу (рисунок 1 а)). ПП разделены газовой средой (воздух при нормальных условиях), которая задана в виде полушара, центр которого находится в центре излучающей поверхности мембраны. На сферической поверхности задается условие согласованного импеданса, вследствие чего акустические колебания среды не отражаются от этой границы, как бы уходя в бесконечную среду.

На основании результатов, полученных с помощью программы ANSYS, и проведенных экспериментальных испытаниях теоретической модели, построена диаграмма направленности в полярных координатах (рисунок 1 б)).



а). б).

Рис. 1. а). Геометрическая модель пары излучатель-приемник; б). Диаграмма направленности.

По теоретическим расчетам ширина диаграммы направленности на уровне 0,5 составляет порядка 12 градусов, а по экспериментальным данным 15 градусов. Таким образом, максимальная скорость потока по теоретическим данным составляет 44 м/с, а по экспериментальным данным 54 м/с. Тем не менее, максимальная скорость потока снижается при увеличении минимального уровня принимаемого сигнала.

Очевидным способом расширения диаграммы направленности является добавлении к ПП акустически рассеивающей линзы. Это решение было проверено теоретическими и практическими экспериментами.

Для теоретического исследования влияния линзы потребовалось изменение геометрической модели, заключающееся в том, что на излучающую в среду мембрану ПП нанесена выпуклая линза радиусом кривизны 35 мм из эпоксидного компаунда и из эколайта. Производился расчет возникающего среднего давления на мембрану приемника. По результатам теоретических расчетов добавление линзы из этих материалов не приносит ожидаемого расширения диаграммы направленности ПП.

Реализация теоретического эксперимента на практике привела к следующим результатам.

– Нанесение выпуклой линзы из эпоксидного компаунда увеличило ширину диаграммы направленности на 1,4 градуса. При этом чувствительность снизилась на 75 %.

– Нанесение выпуклой линзы из эколайта увеличило ширину диаграммы направленности на 1,3 градуса. При этом чувствительность снизилась на 49%.

Таким образом, из полученных результатов следует, что для ПП, работающих в импульсном режиме, нанесение линзы для расширения диаграммы направленности не

целесообразно из-за существенного снижения чувствительности ПП, что является неприемлемым для ПП.

С другой стороны, расширение диаграммы направленности ПП с помощью выпуклой линзы возможно при подборе соответствующего материала, позволяющего обеспечить максимальную передачу акустической энергии от мембраны через линзу в среду.

Список литературы

1. Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. III. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Изд-во СКНЦ ВШ, Ростов-на-Дону, 2006. 335 с.
2. Кремлёвский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
3. ANSYS. Theory Ref. Rel. 8.0 / Ed. P. Kothnke/ANSYS Inc., Houston, 2003.

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

О.В. Шатуновский, М.О. Шатуновский

ООО «Пьезоэлектрик», г. Ростов-на-Дону

Датчики давления являются неотъемлемой частьюбольшинства современных узлов учета воды, газа и других энергоносителей.

Важным требованием для автономных систем является низкое энергопотребление, т.к. источники питания имеют ограниченный ресурс, что определяет продолжительность работы системы и периодичность её обслуживания.

Описываются особенности разработки датчиков давления для автономных измерительных систем. Рассматриваются характеристики датчиков: выходные сигналы, диапазоны питания, производительность, режимы пониженного энергопотребления, схемотехника датчика. Данные по техническим характеристикам приведены для датчиков 415, производства ООО «Пьезоэлектрик».

Рассмотрим основные характеристики и конструктивные особенности датчиков, влияющие на энергопотребление.

Наиболее характерные, выходные сигналы датчиков представлены на рис. 1.

Рис. 1. выходные сигналы датчиков

Как показано на рис. 1 выходные сигналы датчиков можно разделить на два больших класса: аналоговые и цифровые, а так же подклассы токовые и вольтовые.

Условно датчик можно представить в виде двух узлов: собственно преобразователя давления и электронного преобразователя выходного сигнала, рис. 2.

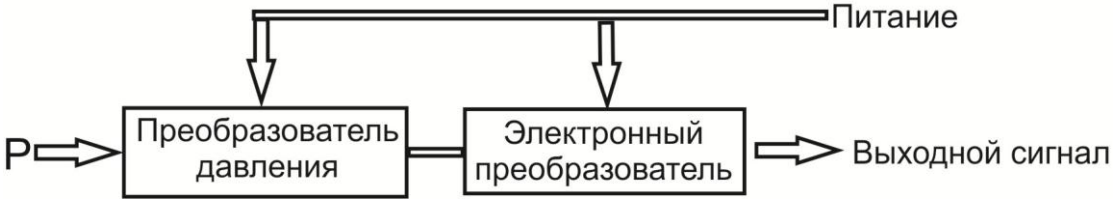


Рис. 2. Схема датчика

На рис. 3 показаны диаграммы типовых токов потребления датчиками с различными выходными сигналами. Нижняя часть диаграмм соответствует току потребления первичного преобразователя, верхняя – электронного преобразователя выходного сигнала.

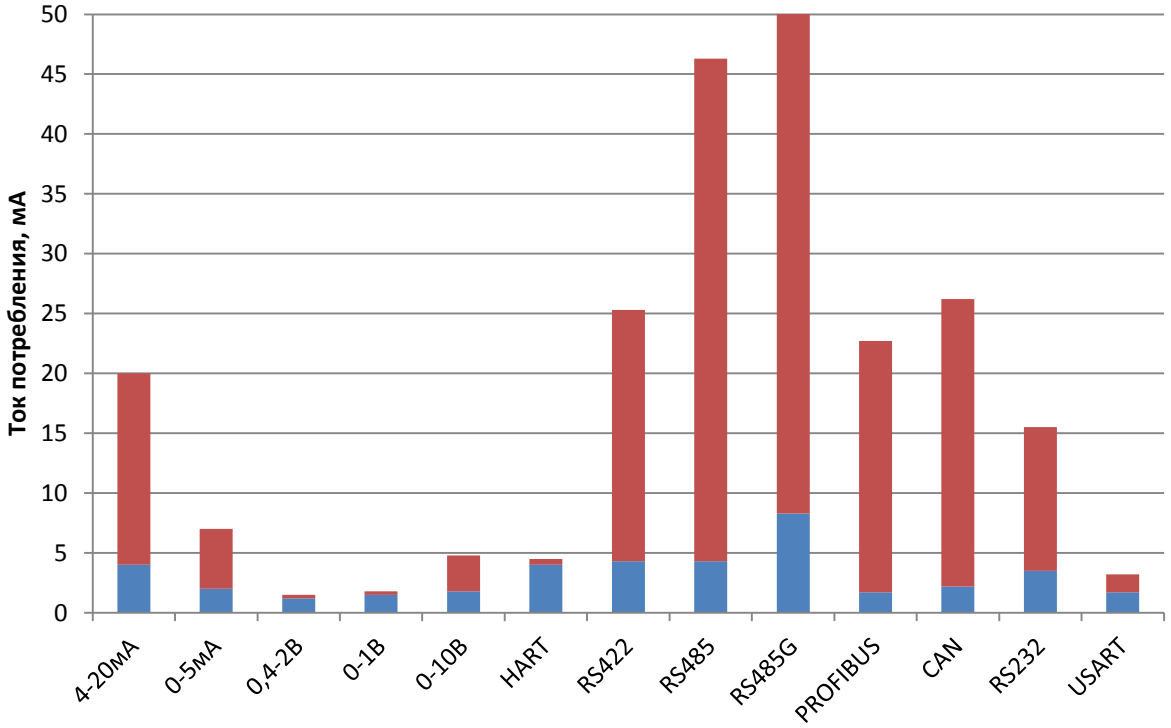


Рис. 3. Типовые токи потребления

Из рис. 3 следует, что минимальному току потребления оказываются датчики с выходными аналоговыми, вольтовыми и цифровыми по интерфейсу USART. Аналоговый сигнал 4-20мА имеет большой ток потребления. К очевидным недостаткам мало потребляющих датчиков, надо отнести низкую скорость передачи данных, например HART интерфейс имеет скорость передачи 1200 бод.

Рассмотрим напряжение питания датчиков. В автономных системах используются независимые источники питания – аккумуляторы преимущественно с рабочим напряжением 3,6 и 12В.

На рис. 4 показаны диаграммы диапазонов напряжения питания датчиков.

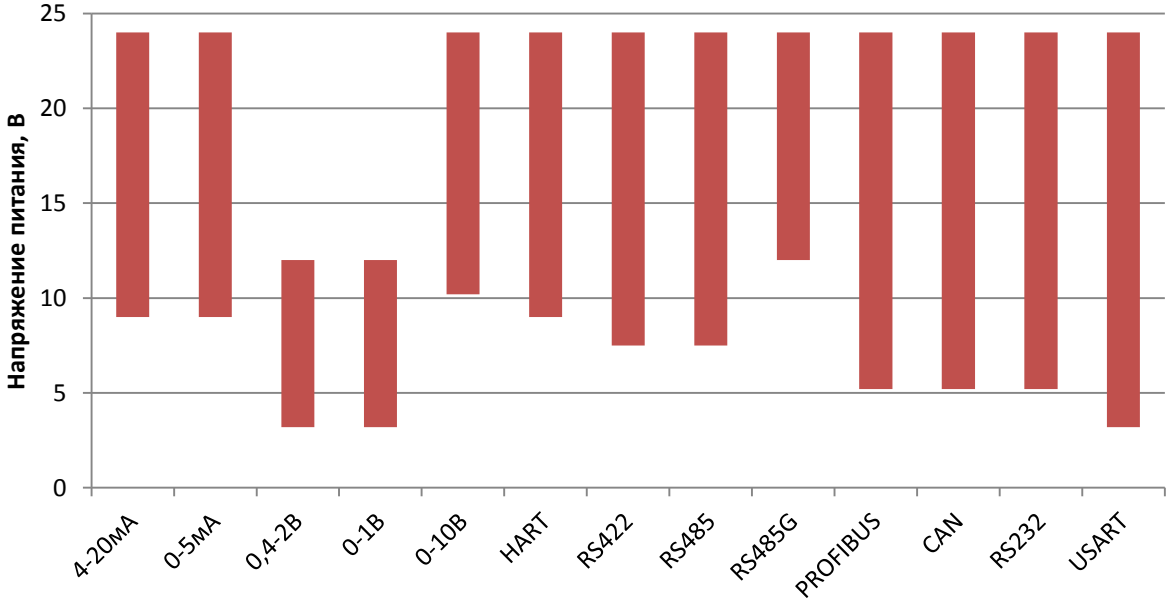


Рис. 4.Напряжения питания датчиков

Из рис. 4 видно, что практически все виды датчиков можно использовать, с автономным питанием. Но датчики с аналоговым вольтовым выходным сигналом и с цифровым сигналом USART имеют наибольшее предпочтение, т.к. они могут питаться от литиевой батареи или аккумулятора с напряжением питания 3,6В.

На сегодняшний день в ООО «Пьезоэлектрик» разработаны и серийно выпускаются датчики давления типа 415 для автономных измерительных систем со следующими характеристиками:

1. Датчики предназначены для измерения избыточного давления ДИ, разрежения ДВ, давления-разрежения ДИВ, абсолютного давления ДА, гидростатического давления ДГ и разности давлений ДД воды, газа, пара и других сред.

2. Пределы измерений:

- избыточное давление от 0,1 кПа до 100 МПа
- абсолютное давление от 25 кПа до 16 МПа
- разрежение от 0,1 кПа до 100 кПа
- давление-разрежение от ±0,05 кПа до – 0,1…2,4 МПа
- разность давлений от 0,25 кПа до 2,5 МПа
- гидростатического давления от 0,25м в.ст. до 25м в.ст.

3. Основная погрешность 0,5 (0,25; 0,15)%

4. Рабочая температура 5…50 (1…80; -30…50, -40…80) °С

5. Выходной сигнал 0,4-2В, USART

6. Вид взрывозащиты: искробезопасная электрическая сеть и взрывозащищенная оболочка

7. Степень защиты от воздействия пыли и воды IP65

8. Материал штуцера и корпуса – сталь 12Х18Н10Т
измерительной мембраны – титан, сталь 12Х18Н10Т

9.Напряжение питания от 3,2 до 5 (12, 24)В

10.Ток потребления от 0,8 до 2,8мА

Датчики давления 415 пригодны для решения большинства инженерных задач таких как: диагностики и управления системами технологического контроля и автоматики энергетического оборудования, коммерческого учета расхода энергоносителей, измерения уровня, и в самых различных отраслях промышленности, а также в ракетно-космической технике и авиастроении.

Таким образом, для работы в автономных измерительных системах предпочтительнее всего использовать датчики с вольтовыми выходными сигналами 0,4-2В и цифровым сигналом USART, т.к. эти сигналы имеют большую скорость передачу, при малом энергопотреблении, что позволяет осуществлять питание датчика от литьевой батарейки в режиме опроса.

Список литературы

1. Руководство по эксплуатации 4.15.00.000 РЭ, издательство ООО «Пьезоэлектрик», 2011. – 56 с.

2. EIA-485 — Electronic Industries Alliance-485, http://musidora.ru/format485.htm

3. ГОСТ 25520-85 Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП.

4. ANSI/TIA/EIA-232 — American National Standards Institute/ Telecommunications Industry Association/ Energy Information Administration-232, http://celnet.ru/ansi.php

5. TIA-422 — Telecommunications Industry Association-422, TEA/EIA STANDART, May 1994, издательство Telecommunication industry association.

6. HART Communication Protocol — HART Communication Foundation, http://www.hartcomm.org/

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ВЯЗКОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ПЛОТНОМЕРА

О.В. Зацерклянный

ООО «Пьезоэлектрик»,г. Ростов-на-Дону

В вибрационных плотномерах плотность жидкости или газа определяется по резонансной частоте некоторого тела (вибратора), взаимодействующего с измеряемой средой. В погружных преобразователях механический резонатор помещают в контролируемую жидкость, действие которой подобно действию некоторой "присоединенной массы", связанной с резонатором и увлекаемой им в колебательное движение. Величина присоединенной массы зависит от плотности вещества, следовательно, девиация частоты резонансных колебаний является параметром, по которому определяется плотность.

На основе этого принципа разработан вибрационный Плотномер 804 [1].Сравнение с лучшими зарубежными и отечественными аналогами, приведенное в таблице 1, показывает, что Плотномер 804 не уступает по диапазону и точности измерения лучшим отечественным и зарубежным образцам, а также полностью адаптирован к условиям крайнего севера. Единственный параметр, по которому существует отставание от Solartron 7828, является значение верхней границы вязкости измеряемой жидкости. Расширение диапазона вязкости измеряемых сред является условием дальнейшего продвижения плотномера в стратегических отраслях промышленности России.

Целью данной работы является изучение возможности работы вибрационного преобразователя плотности в средах с вязкостью до 10000 спз.

Исследование 10 серийных образцов Плотномеров 804 показало, что при измерениях плотности жидкости с вязкостью 200 спз только 8 из 10 плотномеров подтвердили погрешность 0,5 кг/м^3, при увеличении вязкости до 1000 спз заявленной погрешности соответствовали только 20% образцов. Погрешность на остальных образцах достигала 10 кг/м^3.

Таблица 1.

Параметр	Solartron 7828 Великобритания	Плот-3 Россия	804 Россия
Диапазон измерений, кг/м^3	0÷3000	0÷120 420÷1600	0÷160 620÷1630
Погрешность, кг/м^3	1,0	0,3	0,5
Температура среды, С	-50÷200	-40÷85	-70÷80
Вязкость жидкости, спз	до 20000	до 200	до 100
Давление среды, МПа	20	6,3	16
Потребляемая мощность, ВА	1,68	0,54	0,48

Погружение механического резонатора в вязкую жидкость приводит к снижению добротности, которое может достигать двух порядков. На рисунке 1 представлены фазо-частотные характеристики «сухого», т. е. без учета свойств жидкости камертонного преобразователя с различной добротностью.

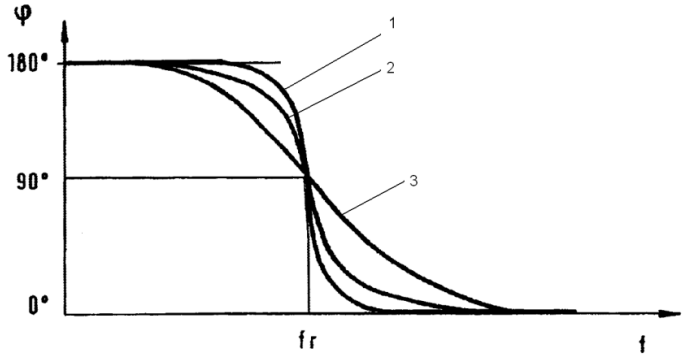


Рис. 1. 1-Q=1000; 2- Q=500; 3- Q=100

Видно, что для адекватного преобразования частоты колебаний камертона в значение измеряемой плотности необходимо обеспечить возбуждение при постоянном сдвиге фаз φ равном 90°. В этом случае частота однозначно зависит только от присоединенной массы и не зависит от добротности колебательной системы.

С цельюподтверждения этого факта, а также определения требований к электронной схеме возбуждения камертона была проведена серия испытаний первичных вибрационных преобразователей камертонного типа (камертонов). Испытания проводились на двух группах ньютоновских жидкостей. К первой группе относились жидкости с разной плотностью и малой вязкостью (не более 1,2 спз), жидкости второй группы были близки по плотности и отличались вязкостью (см. таблицу 2).

Таблица 2. Значения плотности и вязкости жидкостей при температуре 20 ^{o}С

Наименование	Плотность, кг/м^3	Вязкость, спз
Вода	998,2	1,00
Бензин	686	0,54
Спирт	820	1,19
Хлористый метилен	1326	0,46
Перхлорэтилен	1625	0,68
ПМС-5	921	5
ПМС-20	945	20
ПМС-100	961	100
ПМС-1000	966	1000
ПМС-10000	971	10000

Экспериментальные фазочастотные характеристики камертона в различных средах представлены на рисунке 2.

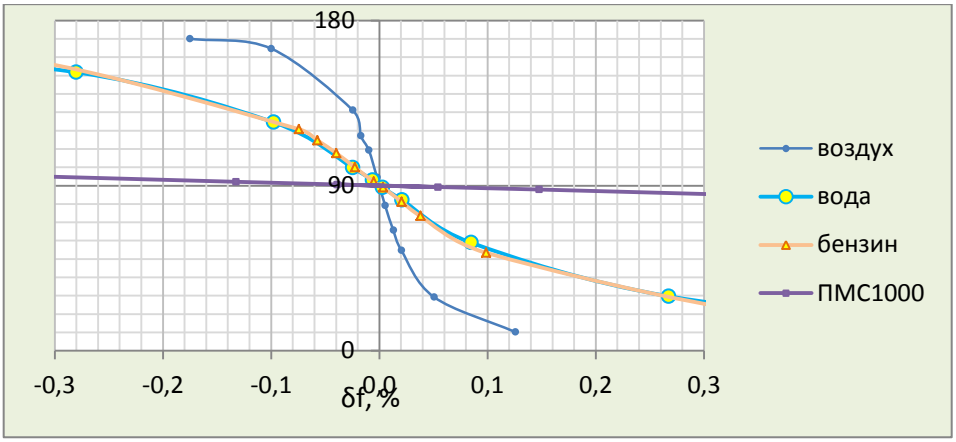


Рис. 2. Экспериментальные фазочастотные характеристики камертона

Согласно [2], частота колебаний камертона связана с плотностью жидкости следующим соотношением:

$$f/f_0 = (1 + K\rho_f / \rho_m)^{-1/2} \qquad (1)$$

f – частота камертона в среде; f_0 – частота камертона в вакууме;

ρ_f – плотность среды, кг/м^3; ρ_m – плотность материала камертона, кг/м^3;

K - безразмерный коэффициент,связанный с геометрией и упругими модулями материала камертона. Константа K определяется по экспериментальным данным. Из (1) следует:

$$K = (f_0^2/f^2 - 1) * \rho_m / \rho_f \qquad (2)$$

Если частота резонанса при ***φ***равном 90° не зависит от вязкости, то коэффициент ***K*** останется постоянным для сред с различными вязкостями. В таблице 3. приведены значения резонансных частот и констант для одного из испытанных камертонов.

Таблица3. Резонансные частоты и константы *K* для одного из камертонов

Наименование	Частота, Гц	K	Вязкость, спз
Воздух	1330,34	3.6915	0,0017
Бензин	1155,862	3,6852	0,54
Вода	1326	3,6916	1,00
ПМС-1000	1067,0	4,453	1000

Видно, что для трех сред с малой вязкостью значения коэффициента ***K*** близки друг к другу. Однако для вязкой среды ПМС-1000 коэффициент*K*отличается на 21%. Полученные результаты не позволяют рассматривать погружение в жидкость вибрационного преобразователя, как только увеличение массы, а вязкость как простое уменьшение добротности системы. Как способ учета влияния вязкости на систему, может

быть предложена калибровка плотномера (***K= f(η)***) по вязкости. Следовательно, одним из путей расширения диапазона вязкости вибрационного плотномера является введение поправочных коэффициентов по вязкости среды.

Список литературы

1.www.piezoelectric.ru/Densimeter804.html

2.Лопатин С.С., Пфайффер Х. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков// Технические средства автоматизации. 2004, № 12.,с 24-29.

3.Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. Т. 3. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006. 346 с: ил.

4.Физические величины: Справочник/ А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. -1232 с.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ГАЗА

О.М. Богуш

ООО «Пьезоэлектрик», г.Ростов-на-Дону

Ультразвуковые расходомеры (УЗР) основаны на измерении времени прохождения акустических колебаний через движущийся поток[1,2]. Доля УЗР на мировом рынке среди всех средств изменения расхода различных энергоносителей составляет около 10% [3]. В последние годы достаточно интенсивно ведутся разработки и освоение в промышленности УЗР газа.

Целью настоящей работы является анализ конструктивных особенностей, метрологических и эксплуатационных характеристик и тенденций развития промышленных УЗР газа российских и зарубежных производителей на основании литературных источников.

Ведущими предприятиями в данной области техники в России являются ОАО «Теплоприбор», Рязань [4], ЗАО «Даймет», Тюмень [5], ООО НПО «Вымпел», Саратов [6], ООО «Тирес» Челябинск [7], ООО «Ирвис», Казань [8]. В ближнем зарубежье УЗР газа выпускают РУП «Белгазтехника», Минск, Белоруссия [9]. Разработчиком и поставщиком пьезоэлектрических преобразователей для большинства российских и белорусских производителей УЗР газа является ООО «Пьезоэлектрик», г.Ростов-на-Дону.

Среди зарубежных производителей, выпускающих УЗР газа и работающих на российском рынке, отметим Controtron [10] и GEPanametric [11]. США, ABLE Instruments & Controls Limited, Англия [12].и SICK/Maihak GmbH, Германия [13].

Конструктивные особенности и технические характеристики УЗР газа этих производителей приведены в таблице.

Приборы данного типа российских предприятий являются полномерными УЗР, т.е. обеспечивающие измерения потока газа через все сечение трубопровода. В них используется преимущественно время-импульсный метод измерения расхода, основанный на регистрации разности времени прохождения акустической волны вдоль и против потока. Возбуждение и прием акустической волны осуществляется с помощью пьезоэлектрических преобразователей. Диаметры условного прохода трубопровода варьируются от 25 до 1600 мм. Динамические диапазоны измерений в пределах одного типа трубы составляют от 1:60 до 1:200. Для Ирвис-РС4-Ультра - 360. Относительная погрешность измерений не превышает $\pm$1-2%.

Имеются также УЗР газа, использующие корреляционный метод измерений, основанный на регистрации времени прохождения неоднородностей потока межу двумя акустическими лучами, просвечивающими трубопровод перпендикулярно потоку. Этот метод реализован в приборах «Dymetic-1223К», обеспечивающий измерения в трубах большого диаметра от 100 до 1200 мм с пределом измерений до 288000 м3/час. Однако кратность динамического диапазона не превышает 1:60, а погрешность - $\pm$1,5 – 2,5%.

В приборах «Гиперфлоу УС», ориентированных на трубопроводы большого диаметра от 100 до 1600 мм, используются 2 пары пьезоэлектрических преобразователей с широкой

диаграммой направленности и время-импульсный метод. При этом 2 акустических луча распространяются по траектории в виде V или W, т.е. с отражение от стенок трубы. 2 пары лучей и многократное пересечение потока позволяют обеспечить относительную погрешность от 0,85%. Однако эффективное отражение от стенок трубы возможно при идеальном их состоянии. При наличии в газе капельной жидкости или жидкой фазы, что является весьма типичным при измерении, например, попутного нефтяного газа, такие расходомеры становятся ненадежными.

Зарубежные УЗР газа обладают большим конструктивным разнообразием. Имеются время-импульсные и корреляционные расходомеры, а также зондовые модификации и с накладными датчиками. Для возбуждения и приема акустической волны в приборах с накладными датчиками используются электромагнитные преобразователи.

Для приборов с врезными датчиками используются пьезоэлектрические преобразователи.

Полномерные УЗР газа зарубежных производителей обеспечивают измерения в трубах диаметром от 50 до 1200 мм. Динамические диапазоны измерений составляют 1:50 …1:150. Погрешность измерений УЗР с одним акустическим лучом составляет ±2%.При 2-х лучевой схеме измерений обеспечивается погрешность ±1%, а при 4-х лучевой схеме - ±0,5%. Имеются также и 8-ми лучевые схемы, обеспечивающие погрешность ±0,2%, которые используются как образцовые средства. Высокая точность достигается за счет калибровки и коррекции погрешностей полиномом.

Зондовые УЗР газа фирм GEPanametric США и ABLEInstruments&ControlsLimited, Англия обладают рекордными динамическими диапазонами, достигающими 1:3000. Это обеспечивается за счет увеличения амплитуды возбуждающего импульса до 3000 В и расположения преобразователей вдоль оси потока. Осевое расположение преобразователей позволяет избежать смещения акустической волны относительно оси преобразователей при больших скоростях потока. Однако, погрешность измерений зондовых УЗР газа составляет 3-7%. Это объясняется тем, что акустический луч просвечивает ограниченную площадь потока.

Сравнение технических характеристик российских и зарубежных полномерных УЗР газа показывает, что типоразмерный ряд у российских приборов шире в области малых труб (от 25 мм), а динамические диапазоны больше (до 1:200 и 1:340), чем у зарубежных аналогов. Однако, погрешность измерений, составляющая от 0,2%, у зарубежных приборов ниже, чем у российских. Это достигается за счет использования многолучевых схем и коррекции погрешностей полиномом.

Кроме того зарубежные УЗР газа имеют зондовые исполнения, а также исполнения с накладными преобразователями, обеспечивающие монтаж без врезки в трубопровод. Отметим, что зондовые УЗР газа обладают рекордные динамические диапазоны (до 3330 м/с). При этом погрешность измерений повышается даже при 2-х лучевой схеме до 2,5-5%.

Список литературы

1.Кремлёвский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1989, 701 с.

2.Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. III. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Изд-во СКНЦ ВШ, Ростов-на-Дону, 2006. 335 с.

*3.Зулькарнаев В.Р.*Мировой рынок вихревых расходомеров. Текущее состояние рынка и позиции ОАО ИПФ "Сибнефтеавтоматика//Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, № 2, 2010.

4. Ультразвуковой счетчик газа ГОБОЙ-1, www.centre-pribor.ru, ЗАО «Центрприбор», 2012.

5. Датчик расхода газа Dymetic-1223-K, www.dymet.ru, ЗАО «Даймет», 2012.

6. Расходомер ультразвуковой «ГиперФлоу-УС», http://www.npovympel.ru, ООО НПП «Вымпел»,2012.W

7. Ультразвуковые газовые расходомеры PS-1,http://tmces.ru**,** ооо "технология измерения расхода электронными системами",2012.

8.Ирвис-РС4-Ультраhttp://www.gorgaz.ru, ООО НПП «Ирвис», РФ, Казань, 2012.

Таблица. Характеристики российских и зарубежных УЗР газа

N	Предприятие, страна, город	Марка	Принцип действия	Температура		Давление	Ду, мм	Динамич. диапазон, $м^3$/час			Погрешн., ± %
				min	max	max, МПа		Qmin	Qmax	Кратн.	
1	ОАО Теплоприбор, РФ, Рязань	Гобой-1	УЗ, время-имп	-35	50	2.0	25-80	1,0	160	1:160	(1+[5Qmin/Q])
2	ЗАО «Дайметик», РФ, Тюмень	Dymetic-1223-K	УЗ, корреляц.	-40	60	4,0	100-1200	15	288000	1:60	1,5, 2,5
3	ЗАО «Дайметик», РФ, Тюмень	Dymetic-1223-T	УЗ, время-имп.	-40	85	4,0	25-300	0,25	7000	1:200	1,0, 1,5
4	ООО ТИРЕС, РФ, Челябинск	PS-1	УЗ, время-имп	-30	80	2,0	50-250	1,1	5200	1:190	1.0
5	ООО НПО «Вымпел», РФ, Саратов	Гиперфлоу УС	УЗ, время-имп	- 40	85	16	100-1600	5	200000	1:200	0,85 – 2,5
6	ООО НПП «Ирвис», РФ, Казань	Ирвис-РС4 Ультра	УЗ, время-имп	- 40	45	1,6	50	0,5	230	1:460	1,0 при Qпер. ...Qнаиб.
7	Белгазтехника, РБ, Минск	СПГ-1	УЗ, время-имп	-40	50	0,7	50-80	2	250	1:10, 1:60	1,0
8	Controlotron,США	1010GC	УЗ, накладные	-40	120	0,5-22	50 .. 1400	Скорость ± 38 м/с		1:50, 1:100	1,0 - 2,0
9	GE Panametrics, США	CTF878	УЗ, корреляц	-40	130	0.17	152 .. 762	Скорость 1 .. 46 м/с		1:43	2,0
10	GE Panametrics, США	GF868	УЗ, зондовые	-70 (-220)	150 (280)	10,5	76 .. 3000	Скорость 0,03 .. 84 м/с		1:2750	3 .. 7 (1 луч), 2,4.. 5 (2 луча)
11	GE Panametrics, США	XGS868i	УЗ, время-имп.	-50 (-190)	150 (450)	18.7	50 .. 1200	Скорость ±46 м/с		1:150	1,0… 2,0
12	ABLE Instruments & Controls Limited, Англия	FGM160	УЗ, зондовый	-110 (-150)	145 (315)	0,1..2,0	Более 150	Скорость 0,03…100м/с		1:3330	2,5…5
13	SICK/MaihakGmbH, Германия	FLOWSIC600	УЗ, время-имп.	-190*	280*	25*	50-1400	6,0	130000	1:67	2,0 (1 луч), 1,0 (2луча), 0,5(4 луча) 0,2(8 лучей)**

Примечание: *- по запросу; **- после калибровки и коррекции полиномом.

9.Ультразвуковые расходомеры газа «СПГ-1», http://www.belgastechnika.by., РУП "БЕЛГАЗТЕХНИКА", Беларусь, 2012.
10.Ультразвуковой расходомер 1010GC, http://www.industry.usa.siemens.com., SIEMENS, США, 2012.
11. Ультразвуковойрасходомер FGM160, http://www.able.co.uk, ABLE Instruments & Controls Limited, Англия, 2012/
12.Ультразвуковой расходомер WLOWSIC600, http://www.sick-maihak.ru/, SICK/MaihakGmbH, Германия,2012.
13.Ультразвуковой расходомер газа FLOWSIC 600, www.sick-maihak.ru, *SICK|Maihak GmbH*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ АКСЕЛЕРОМЕТРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Янчич Вл. В., Митько В.Н.

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Рассматривается характер механических деформаций в преобразователе акселерометра, выполненном в виде блока из пьезокерамического материала (ПКМ), возникающих под воздействием виброускорения и деформации со стороны контролируемого объекта.

При работе пьезоэлектрического акселерометра на его электромеханический преобразователь, кроме измеряемого виброускорения, оказывают механическое воздействие также иные факторы. К таким факторам, способным вызвать значительные искажения выходного сигнала акселерометра, относятся механические напряжения и вызываемые ими деформации, возникающие в контролируемом объекте в процессе функционирования. Деформации объекта в месте расположения акселерометра, через его основание передаются пьезоэлектрическому преобразователю и приводят к возникновению сигнала помехи. Наибольшую чувствительность к деформации основания имеют акселерометры компрессионного типа, при деформации пьезоэлементов которых не происходит взаимной компенсации паразитных сигналов. В таких акселерометрах сигнал от деформации основания преимущественно определяется нерабочим пьезомодулем d_{31} и иногда может превышать полезный сигнал на один-два порядка [1, 2].

С целью получения данных, необходимых для конструирования пьезоэлектрических акселерометров, на примере математической модели, исследован характер механических деформаций и электрических полей, возникающих под воздействием виброускорения и деформации со стороны контролируемого объекта в преобразователе акселерометра, выполненном в виде блока из пьезокерамического материала (ПКМ). При моделировании применялся программный пакет ANSYS для исследования конечно-элементных математических моделей, открывающий широкие возможности совершенствования пьезоэлектрических преобразователей различных типов [3].

Рассматривался цилиндрический блок 1 (рис. 1) с размерами ∅10×10 мм, выполненный из ПКМ ЦТС-19 и поляризованный в продольном направлении (P_0). Электроды 2 нанесены на верхний и нижний торцы блока. Крепление блока к основанию 3 осуществляется одним из его торцов.

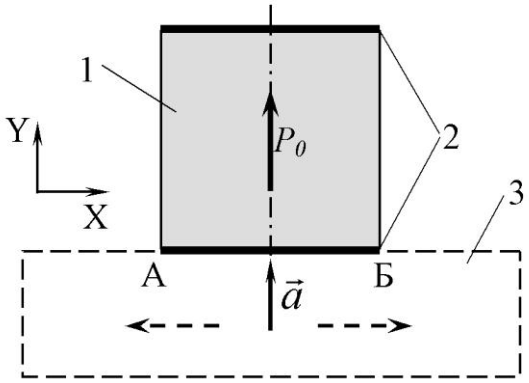


Рис. 1. Исследуемая модель преобразователя:
1 – блок из ПКМ; 2 – электрод; 3 – основание

Полагается, что модуль упругости основания много больше модуля упругости ПКМ. При этом основание не участвует в расчете и играет чисто вспомогательную роль, как тело отсчета для неинерциальной системы координат, движущейся с ускорением a = 1 м·с$^{-2}$. На линии АБ задается крепление блока, при котором ограничено смещение u его точек относительно основания, находящихся на линии АБ, как по оси Y, так и в направлении оси X (u_y= 0, u_x = 0).

Рассматривается статическая осесимметричная задача.

Характер деформации блока под воздействием ускорения в направлении оси Y и возникающие при этом механические напряжения показаны на рис. 2.

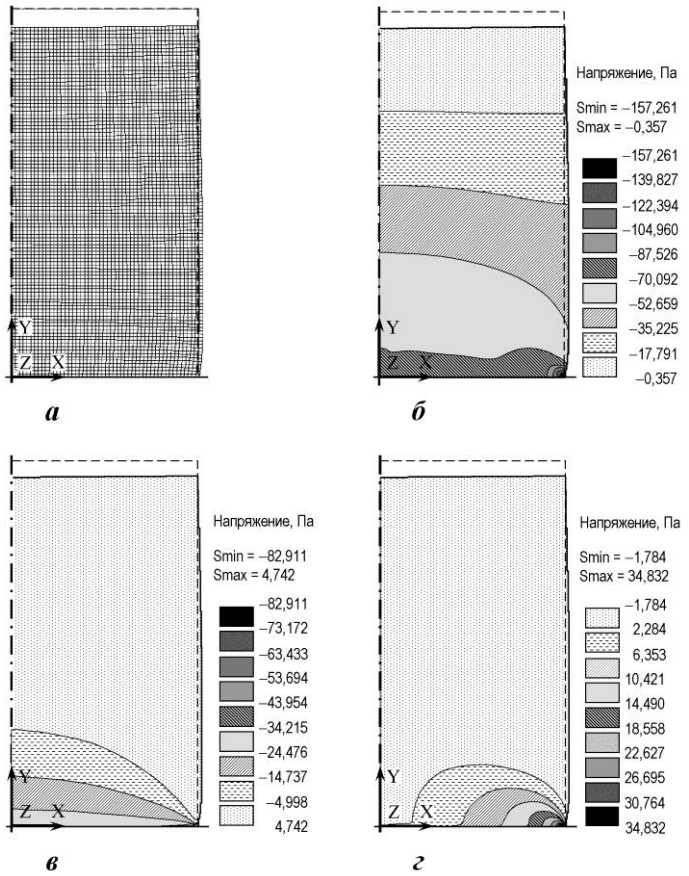


Рис. 2. Деформация блока и механические напряжения под воздействием ускорения:
а – характер деформации блока; б – продольные напряжения S_y;
в – поперечные напряжения S_x; *в* – сдвиговые напряжения S_{xy}

В результате продольной деформации блока генерируемый электрический заряд (полезный сигнал) обусловлен преимущественно рабочим пьезомодулем d_{33}.

Проведенные численные расчеты показали, что рассмотренный преобразователь имеет следующие характеристики:

- коэффициент преобразования по напряжению 8,145 мВ·м$^{-1}$·с^2;
- коэффициент преобразования по заряду 0,816 пКл·м$^{-1}$·с^2;
- электрическая емкость 100,2 пФ;
- частота установочного резонанса 74 кГц.

На рис 3 показаны распределения электрического потенциала и механических напряжений в блоке при однородной радиальной деформации основания в поперечном направлении (обозначена прерывистыми стрелками на рис. 1) с относительным значением $0{,}5\cdot10^{-6}$.

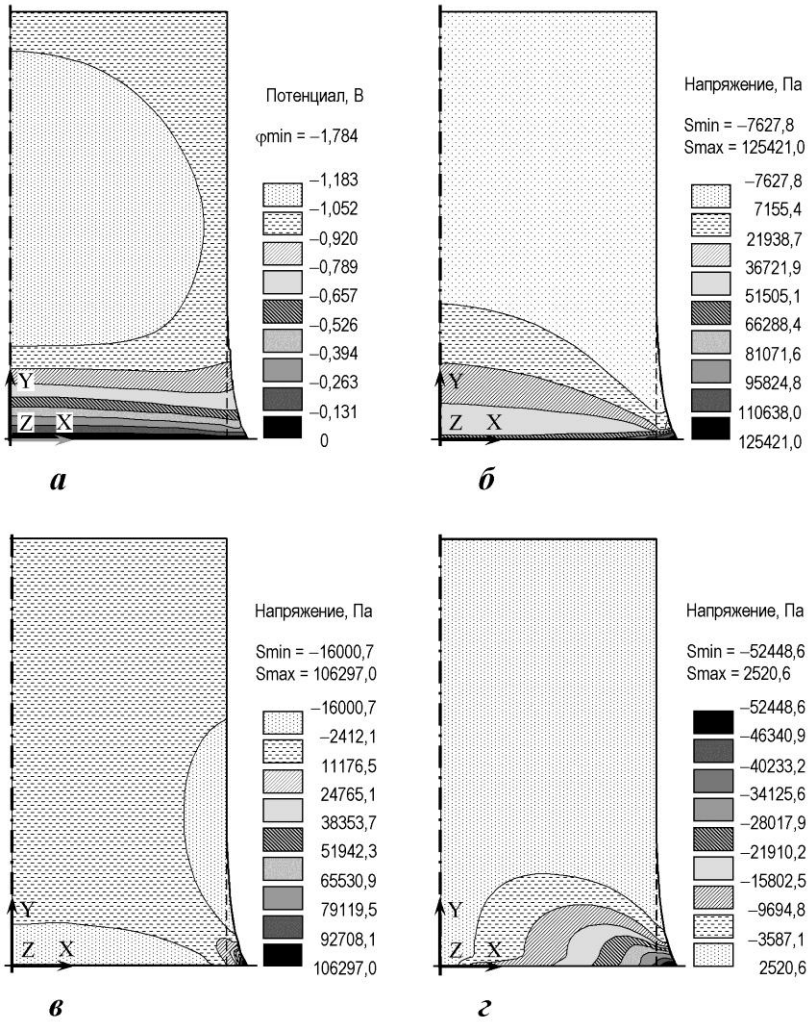


Рис. 3. Распределение различных полевых величин при деформации блока, вызванной однородной деформацией основания:
а – электрический потенциал; *б* – радиальные напряжения S_x;
в – продольные напряжения S_y; *г* – сдвиговые напряжения S_{xy}

Из приведенных рисунков видно, что влияние радиальной деформации основания преимущественно сосредоточено в нижней части блока – зоне влияния, в которой происходит быстрое изменение различных полевых величин.

В данном случае индуцированные на электродах деформацией за счет пьезомодуля d_{31} (сигналы помехи) электрическое напряжение и заряд составляют 1,02 В и 102,2 пКл. Сигналы, вызываемые пьезомодулем d_{15}, взаимно компенсируются.

На рис. 4 в качестве примера приведены распределения электрического потенциала, индуцированного радиальной деформацией основания, в блоках с измененными, по сравнению с первоначальными, значениями высоты и радиуса.

Если при неизменном радиусе блока увеличить его высоту в два раза (рис. 4*а*), то характерные размеры зоны влияния, в том числе и по оси *Y*, не изменяются. Сравнение с рис. 3*а* показывает, что области неоднородности потенциала в обоих случаях совпадают. Аналогичным образом ведут себя и механические напряжения. При этом индуцированное деформацией электрическое напряжение на электродах, по-прежнему равно 1,02 В, а заряд, за счет снижения емкости в два раза, составляет 51,1 пКл.

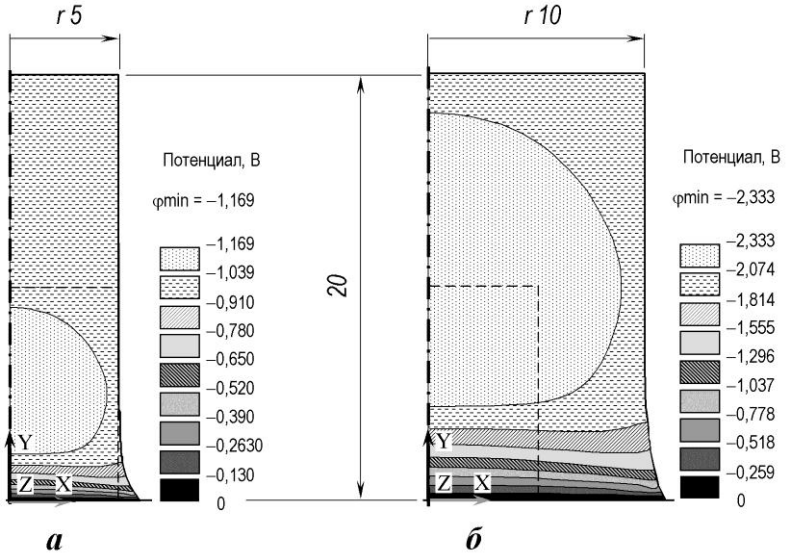


Рис. 4. Распределение электрического потенциала в блоке при удвоенной высоте при неизменном радиусе (*а*) и удвоенных значениях этих параметров (*б*); первоначальные размеры блока выделены прерывистой линией

Если одновременно увеличить в два раза высоту и радиус и блока (рис. 4*б*), то характер распределения деформации и потенциала в нем такой же, как и при первоначальных размерах, но значения этих величин в зоне влияния возрастают. Индуцированное электрическое напряжение между электродами в этом случае равно 2,04 В, а заряд, за счет увеличения емкости в два раза, составляет 408,8 пКл. Расчет показал, что в случае удвоения радиуса при неизменной высоте блока, индуцированное напряжение между электродами также удваивается.

Таким образом, можно говорить об определенной «глубине проникновения» возмущения, вызванного деформацией на границе блока, в его тело и ее связи с геометрическими параметрами. Размеры зоны влияния определяются радиусом блока, при этом ее глубина проникновения составляет около двух значений радиуса.

Сравнение результатов воздействия виброускорения и деформации основания для рассматриваемых геометрических параметров блока, показывает, что при относительной деформации основания $0{,}4 \cdot 10^{-8}$, сигнал помехи равен полезному сигналу, индуцированному ускорением 1 м·с$^{-2}$. При этом никаким разумным соотношением размеров блока, невозможно добиться эффективного снижения сигнала помехи от деформации.

Соответствие количественных данных, полученных при моделировании и экспериментальных исследованиях, свидетельствует о правомерности принятых допущений и возможности использования полученных результатов для оценки влияния внешних деформаций на работу пьезоэлектрических преобразователей датчиков различных механических величин.

Таким образом, при конструировании пьезоэлектрических акселерометров, для снижения коэффициента влияния деформации основания следует руководствоваться традиционным подходом, связанным с увеличением отношения высоты к радиусу пьезоэлемента или основания, повышением коэффициента преобразования за счет увеличения массы инерционного элемента, использованием специальной прокладки, ослабляющей деформацию. Однако эти приемы неизбежно приводит к увеличению массогабаритных параметров датчика и снижению частоты его установочного резонанса и, следовательно, верхней границы рабочего диапазона частот [2]. Альтернативой может явиться поиск механизмов компенсации деформационного сигнала, не приводящих к заметному снижению технических характеристик датчиков.

Список литературы

1. Серридж М., Лихт Т.Р. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям. – Нерум, Дания: Брюль и Къер, 1987. – 201 с.

2. Янчич В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – (Пьезоэлектрическое приборостроение Т. 7). – 304 с.

3. Митько В.Н. Крамаров Ю. А., Панич А. А. Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 240 с. – (Пьезоэлектрическое приборостроение. – Т. 6).

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВУХДИАПАЗОННЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

Янчич В.В., Джения Д.В., Янчич Вл.В.

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

При измерении параметров виброколебаний нижняя граница динамического диапазона измерения ограничена значением коэффициента преобразования используемого датчика, а верхняя – предельным уровнем входного сигнала регистрирующего устройства. Попытка расширения динамического диапазона при непрерывной регистрации ускорения за счет снижения коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра или коэффициента передачи согласующего усилителя приводит к снижению разрешающей способности измерительной системы и, следовательно, точности измерения. Известно также, что повышение коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра с целью снижения порогового значения измеряемого ускорения неизбежно связано со снижением частоты его установочного резонанса и, следовательно, снижением верхней границы рабочего диапазона частот. Аналогично, повышение резонансной частоты акселерометра приводит к снижению его коэффициента преобразования [1].

При проведении практических виброизмерений отмеченные противоречия могут быть преодолены, например, путем одновременной регистрации сигналов от двух разных акселерометров, отличающихся значениями коэффициентов преобразования, или рабочими диапазонами частот. В первом случае, без потери точности измерений, возможно расширение динамического, а во втором – частотного диапазонов измерений. Так как использование двух датчиков часто сопряжено с рядом трудностей (ограниченность пространства, несовпадение точек размещения и др.), представляется

целесообразным применение для этой цели одного датчика, обеспечивающего измерения в двух перекрывающихся динамических или частотных диапазонах.

Такие датчики должны иметь два выхода, соответствующих различным значениям коэффициента преобразования K_1 и K_2 (для двух динамических диапазонов с одним и тем же рабочим диапазоном частот – тип А), или, дополнительно, различными значениями частоты установочного резонанса $f_{р,1}$ и $f_{р,2}$ – тип Б (рис. 1).

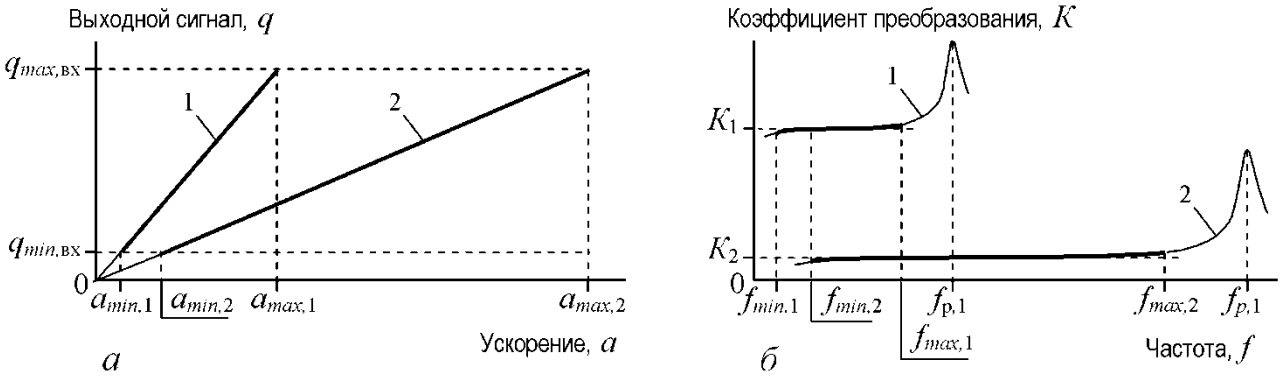


Рис. 1. Амплитудная (*а*) и амплитудно-частотная (б) характеристики двухдиапазонного акселерометра: 1, 2 – для первого и второго диапазонов; $a_{min,1}$, $a_{min,2}$, $a_{max,1}$, $a_{max,1}$, $a_{max,2}$, $f_{min,1}$, $f_{min,2}$, $f_{max,1}$, $f_{max,2}$ – минимальные и максимальные значения измеряемых ускорений и рабочих частот, соответствующие первому и второму диапазонам

Последний вариант представляется более перспективным, так как позволяет реализовать два динамических и частотных диапазона. Это дает возможность одновременно измерять малые ускорения на низких частотах и большие ускорения на высоких частотах, что часто используется при виброакустической диагностике и мониторинге технического оборудования [2]. Соотношения значений коэффициентов преобразования и резонансных частот должны выбираться исходя из конкретных условий задачи измерения и особенностей регистрирующей аппаратуры.

Если при работе с датчиком ограничиться применением согласующего усилителя напряжения (СУН), то двухдиапазонный акселерометр типа А, принимая во внимание его работу в режиме близкому к режиму холостого хода, может быть реализован, например, следующими способами (рис. 2):

- на базе обычного преобразователя с внешним или встроенным емкостным делителем напряжения (рис. 2*а*);

- с использованием преобразователя с двухсекционным пьезоэлементом (рис. 2*б, в*).

Анализ схемы (рис. 1*а*) датчика со встроенным емкостным делителем напряжения (емкости соединительных проводников пренебрежимо малы по сравнению с емкостью пьезоэлемента $C_п$) показывает, что коэффициенты преобразования по напряжению$K_{н,1}$ и $K_{н,2}$, соответствующие выходам 1 и 2, без учета емкостей соединительных кабелей и входных емкостей СУН, имеют следующие значения:

$$K_{н,1} = \frac{K_{н,0} C_п}{C_п + C_{общ}}; \qquad (1)$$

$$K_{н,2} = K_{н,1} \frac{C1}{C1 + C2}, \qquad (2)$$

где $K_{н,0}$ – коэффициент преобразования датчика до подключения делителя напряжения; $C_{общ} = (C1 \cdot C2)/(C1+C2)$ – общая емкость делителя.

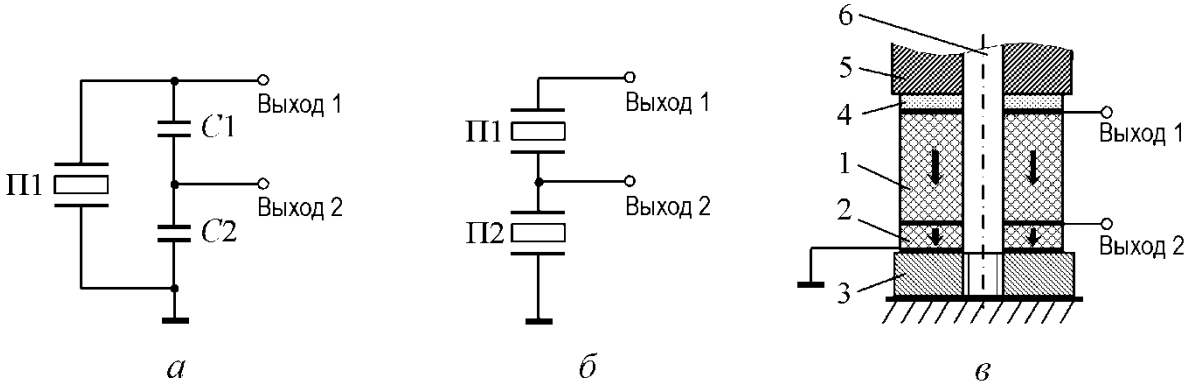


Рис. 2. Схемы двухдиапазонных акселерометров типа А для работы с СУН:
а – электрическая схема акселерометра с емкостным делителем напряжения;
б, в – электрическая и конструктивная схемы с двухсекционным пьезоэлементом;
П1, П2 – пьезоэлемент; *C*1, *C*2 – конденсатор делителя; 1, 2 – секция пьезоэлемента (направление поляризации показано стрелкой); 3 – основание; 4 – инерционный элемент

При подключении к выходам датчика СУН с использованием дополнительных кабелей, значения коэффициентов преобразования по напряжению за счет дополнительных емкостей изменятся [1]:

$$K^*_{н,1} = K_{н,1} \frac{C_{вых,1}}{C_{вых,1} + C_{доп,1}}; \quad (3)$$

$$K^*_{н,2} = K_{н,2} \frac{C_{вых,2}}{C_{вых,2} + C_{доп,2}}, \quad (4)$$

где $C_{вых,1} = C_п + C_{общ}$; $C_{вых,2} = (C_п C_1)/(C_п + C_1) + C_2$; $C_{доп,1} = C_{к,1} + C_{вх,1}$; $C_{доп,2} = C_{к,2} + C_{вх,2}$; $C_{к,1}$, $C_{к,2}$ – емкости соответствующих соединительных кабелей; $C_{вх,1}$, $C_{вх,2}$ – входные емкости соответствующих СУН.

Аналогичным образом работает датчик (рис. 2*б, в*), в котором деление напряжения производится непосредственно на секциях пьезоэлемента. Так как разность потенциалов на электродах пьезоэлемента пропорциональна значению пьезомодуля и обратно пропорциональна емкости электрической цепи, то выбором параметров пьезоэлектрических материалов и геометрии секций пьезоэлемента при определенной емкостной нагрузке могут быть получены необходимые значения коэффициентов преобразования для каждого из выходов датчика.

При одновременном использовании двух согласующих зарядовых усилителей (СЗУ), рассмотренные выше схемы датчиков не могут использоваться. В данном случае, для исключения шунтирования пьезоэлементов входами СЗУ, оба выхода датчика должны выполняться электрически изолированными друг от друга (рис. 3).

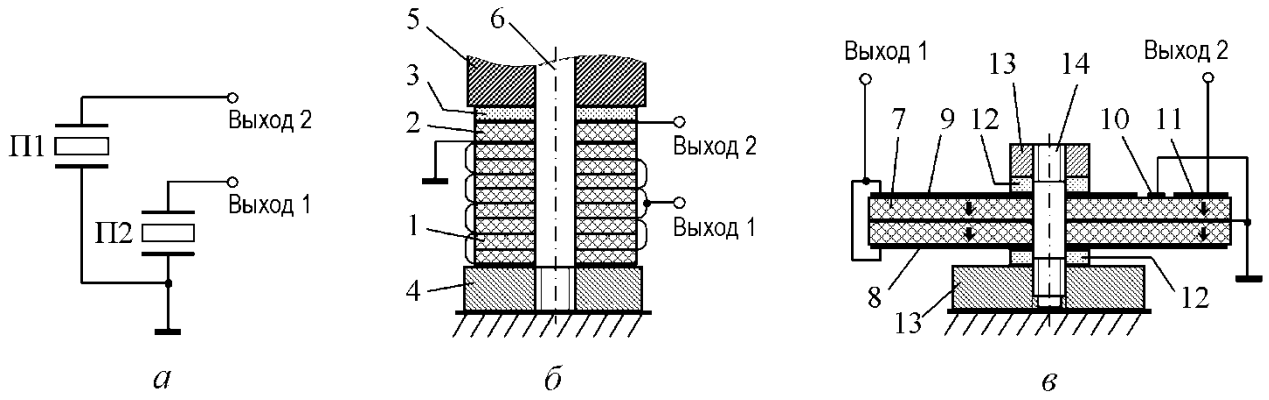


Рис. 3. Схемы двухдиапазонных акселерометров типа А для работы с СЗУ:
а – электрическая схема; *б* – акселерометр с деформацией растяжения-сжатия;
в – акселерометр с деформацией изгиба; П1, П2 – пьезоэлемент; 1, 2 – секция пьезоэлемента; 3, 12 – изолятор; 4, 13 – основание; 5 – инерционный элемент; 6, 14 – шпилька;
7 – биморфный пьезоэлемент; 8–11 – электрод; 13 – гайка; 14 – шпилька

Для повышения коэффициента преобразования по заряду пьезоэлемент 1 (рис. 3*б*) может быть выполнен многослойным с параллельным синфазным соединением электродов. При необходимости, для изготовления пьезоэлементов 1 и 2 возможно использование пьезокерамических материалов с различными значениями пьезомодулей.

В двухсекционном биморфном пьезоэлементе 7 (рис. 3*в*) один из внешних электродов 8 выполнен сплошным, а второй – разделен на две неравные по площади секции 9 и 10 с промежуточным экранирующим электродом 11, устраняющим взаимные наводки между выходами. С некоторыми допущениями можно считать, что коэффициенты преобразования по заряду $K_{з,1}$ и $K_{з,2}$, соответствующие выходам 1 и 2, в рассматриваемом биморфном элементе пропорциональны площадям электродов, то есть:

$$\frac{K_{з,1}}{K_{з,2}} \approx \frac{s_0 + s_1}{s_2}, \tag{5}$$

где s_0 – площадь сплошного электрода; s_1, s_2 – площади электродов, подключенных к выходам 1 и 2.

В процессе исследований макетных образцов датчиков обнаружены следующие особенности их работы. Во-первых, отключение СЗУ от одного из выходов датчика, вызывает изменение коэффициента преобразования работающего канала до 1–3 %. Это объясняется изменением некоторых параметров преобразователя с электромеханически связанными секциями от режимов их нагрузки [3]. Во-вторых, ограничение сигнала в цепи отрицательной обратной связи операционного усилителя, в случае перегрузки одного из СЗУ, приводит к возникновению гармонических составляющих сигнала отрицательной обратной связи на его входе и возбуждению соответствующих мод резонансных колебаний преобразователя. Отмеченное выше относится к недостаткам датчиков рассмотренного типа.

В акселерометрах с двумя динамическими и частотными рабочими диапазонами (типа Б) необходимо исключение взаимного влияния измерительных каналов, особенно заметного на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) высокочастотного преобразователя на частоте резонанса низкочастотного. Принципиально это может достигаться использованием достаточно сложного в реализации механизма компенсации,

или применением преобразователей, между которыми отсутствуют электрическая и механическая связи.

Примером последнего технического решения является акселерометр, изображенный на рисунке 4.

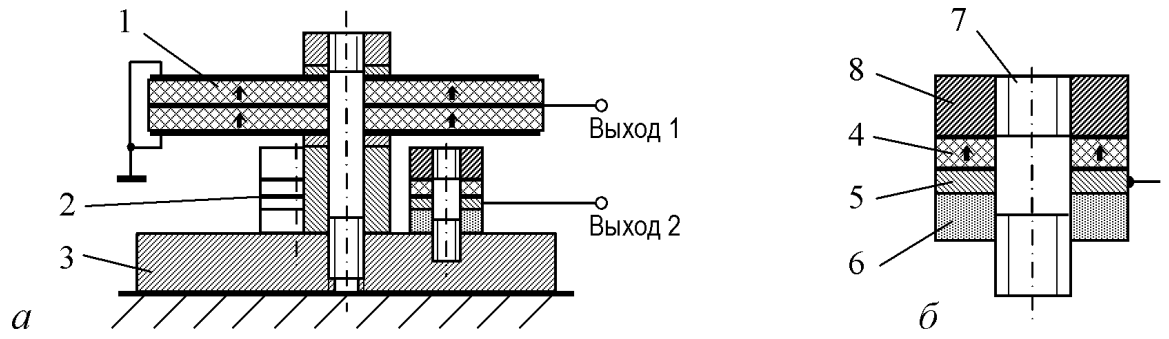


Рис. 4. Конструктивные схемы акселерометра типа Б (*а*) и его высокочастотного преобразователя (*б*): 1 – биморфный пьезоэлемент; 2 – высокочастотный преобразователь; 3 – основание; 4 – пьезоэлемент; 5 – прокладка; 6 – изолятор; 7 – шпилька; 8 – гайка

Акселерометр содержит высокочувствительный низкочастотный преобразователь в виде биморфного пьезоэлемента 1 и группу из трех параллельно включенных высокочастотных преобразователей 2, симметрично расположенных на основании 3. В высокочастотных преобразователях (рис. 4*б*) используется дисковый пьезоэлемент 4 с рабочей деформацией растяжения-сжатия, упруго поджатый к основанию через токосъемную прокладку 5 и керамический изолятор 6 посредством резьбовой шпильки 7 и гайки 8, одновременно выполняющей функцию инерционного элемента. Применение группы симметрично расположенных высокочастотных преобразователей вместо одного способствует снижению коэффициента влияния деформации основания за счет уменьшения отношения их поперечного размера к высоте и относительного коэффициента поперечного преобразования благодаря частичной взаимной компенсации случайно ориентированных диаграмм поперечных чувствительностей.

Выбор свойств пьезоэлектрических материалов и конструктивных особенностей рассмотренных акселерометров позволяет варьировать значения коэффициентов преобразования и рабочих диапазонов частот каждого преобразователя применительно к условиям измерений.

Основные технические характеристики исследованных макетных образцов акселерометров двух типов представлены в таблице 1.

Полученные данные показывают, что выбранные отношения значений коэффициентов преобразования акселерометров типа А составляют 10 и 20, что позволяет расширить динамический диапазон измерения соответственно на 20 и 26 дБ. Одновременное использование второго выхода акселерометра типа Б (отношение коэффициентов преобразования 31) позволяет расширить динамический диапазон на 30 дБ при возрастании верхней границы рабочего диапазона частот до 3,5 раз.

Рассмотренные технические решения могут использоваться также для пьезоэлектрических датчиков иных механических величин, например, пульсации давления, акустического поля, усилия.

Таблица 1

Тип акселерометра	А						Б	
Конструкция	Рис. 2*в*		Рис. 3*б*		Рис. 3*в*		Рис. 4	
Выход	1	2	1	2	1	2	1	2
Коэффициент преобразования (номинальное значение): мВ·м$^{-1}$·с^{2} пКл·м$^{-1}$·с^{2}	 5,0 –	 0,5 –	 – 3 (10)*	 – 0,3 (1)*	 – 20	 – 1	 – 10	 – 0,32
Частота установочного резонанса, кГц, не менее	40		50 (30)*		9		13	50
Максимальная рабочая частота, кГц, не менее, при неравномерности АЧХ, %: 5 12	 8 12		 10 (6)* 15 (9)*		 2 3		 3 4	 10 14
Относительный коэффициент поперечного преобразования, %, не более	5		5		2		1,5	4
Максимальное измеряемое виброускорение, м·с$^{-2}$	6000		7000 (4000)*		1000		5000	
*Примечание. Приведены данные для двух вариантов исполнения								

Список литературы

1. Янчич В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – (Пьезоэлектрическое приборостроение Т. 7). – 304 с.

2. Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики машин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.

3. Земляков В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2019. – (Пьезоэлектрическое приборостроение Т. 5). – 180 с.

МОНОЛИТНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УСИЛИЯ С ФУНКЦИЕЙ КАЛИБРОВКИ

Янчич Вл.В.

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ

Использование встроенного устройства контроля работоспособности пьезоэлектрического датчика механической величины позволяет без его демонтажа на контролируемом объекте проверять исправность всех цепей измерительной системы. Метод тестирования основан на регистрации выходного сигнала датчика при подаче определенного электрического напряжения на калибровочный пьезоэлемент, передающий возникающие при этом деформации рабочему пьезоэлементу [1, 2]. Однако зависимость функции передачи от некоторых факторов, например, межэлементной контактной жесткости и ее температурной стабильности, может привести к значительным ошибкам при калибровке [3].

С целью повышения точности калибровки и упрощения конструкции, разработан преобразователь в виде монолитного блока 1 (рис.1) ∅9,5×8, выполненного из пьезокерамического материала (ПКМ) ЦТС-83. На торцевых поверхностях блока расположены основные электроды 2 и 3, на внешней образующей поверхности блока – два дополнительных кольцевых электрода 4, 5. Блок содержит осевое отверстие,

предназначенное для крепления на основании корпуса датчика 6 путем упругого поджатия.

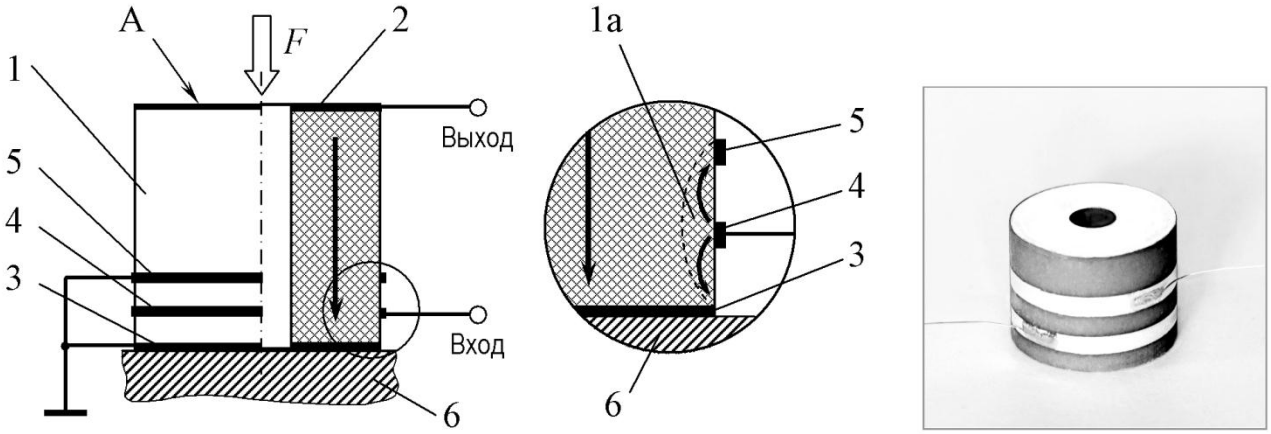


Рис. 1. Конструкция преобразователя:
1 – блок из ПКМ; 1а – дополнительная функциональная зона; 2, 3 – основной электрод; 4, 5 – дополнительный электрод; 6 – основание корпуса датчика; направление поляризации показано стрелками

Объем блока между электродами 2 и 3, наполяризованный в направлении продольной оси, выполняет функцию основной зоны – преобразования измеряемого усилия в электрический сигнал. Область блока между электродами 4 и 5, наполяризованная в противоположном направлении, вместе с областью между электродами 3, 4 образует дополнительную функциональную зону 1а, используемую для тестирования преобразователя.

Воздействие усилия *F*на поверхность А блока приводит к его продольной деформации и, вследствие прямого пьезоэффекта за счет пьезомодуля d_{33}, возникновению на электродах 2, 3 электрического сигнала, пропорционального приложенному усилию. Подача переменного электрического напряжения на электроды 3 и 4, благодаря обратному пьезоэффекту, вызывает деформацию объема дополнительной функциональной зоны. Возникающие при этом механические напряжения, передающиеся основной функциональной зоне, приводят к появлению электрического сигнала отклика на выходе, пропорционального приложенному напряжению на входе. Электрод 5 предназначен также для электростатического экранирования, препятствующего прохождению сигнала между входом и выходом через емкость между электродами 4, 2.

Отсутствие в монолитной конструкции преобразователя межэлементных контактных соединений [4] позволяет исключить влияние ряда связанных с ними факторов на стабильность функции передачи и повысить достоверность тестирования датчика.

Преобразователь может применяться в датчиках силы, пульсации давления, вибрационного и ударного ускорения. При использовании в датчике давления поверхность преобразователя А должна иметь механическую связь с приемной мембраной датчика. При измерении ускорения функцию инерционного элемента выполняет эффективная масса объема блока. Для повышения чувствительности на поверхности А блока может быть установлен дополнительный инерционный элемент.

Усредненные по результатам испытаний характеристики макетных образцов преобразователя приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр преобразователя	Масса дополнительного инерционного элемента, г		
	Отсутствует	5	20
Электрическая емкость выхода, пФ	250		
Коэффициент преобразования усилия: - по напряжению, мВ·Н$^{-1}$ - по заряду, пКл·Н$^{-1}$	 1265 317		
Коэффициент преобразования виброускорения: - по напряжению, мВ·м$^{-1}$·с^{2} - по заряду, пКл·м$^{-1}$·с^{2}	 2,8 0,7	 9,2 2,3	 28,0 7,0
Частота установочного резонанса, кГц	80,2	43,0	24,3
Рабочий диапазон частот [1)], Гц	5–20000	5–10700	5–6000
Дополнительная температурная погрешность коэффициента преобразования, %/°*C*: - по напряжению [2)], мВ·м$^{-1}$·с^{2} - по заряду, пКл·м$^{-1}$·с^{2}	 –0,034 0,042	 –0,036 0,045	 –0,038 0,047
Калибровочный коэффициент [3)]: - мВ/В - пКл/В	 3,96 1,24	 3,92 1,23	 3,81 1,20
Масса преобразователя, г	4,2	9,2	24,2
Примечания: 1) При неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) 6 %. 2) В диапазоне температур от 20 до 250 °*C* при емкостной нагрузке 60 пФ. 3) При нормальных условиях, на частоте 160 Гц.			

Калибровочный коэффициент определяется при нормальных условиях как отношения значений сигнала на выходе (напряжения или заряда) преобразователя к напряжению, поданному на его вход. Выходной сигнал линейно зависит от калибровочного напряжения. Частота максимума выходного сигнала соответствует частоте установочного резонанса преобразователя. Выходной сигнал на горизонтальном участке АЧХ функции преобразования, на частотах приблизительно до одной десятой частоты установочного резонанса, индуцированный практически только поперечными деформациями за счет пьезомодуля d_{31}, однозначно связан с коэффициентом преобразования и может использоваться для проверки работоспособности и калибровки.

Изменение калибровочного коэффициента в процессе эксплуатации свидетельствует об обратимых или необратимых изменениях, произошедших в преобразователе. Наиболее вероятными причинами могут быть механические повреждения или изменение параметров ПКМ, влияющих на коэффициенты преобразования. Характерным признаком механического повреждения является одновременное изменение частоты резонанса.

Принимая во внимание двойной механизм преобразования при тестировании и независимость деформации и коэффициента преобразования по заряду от изменения диэлектрической проницаемости, а также полагая идентичное изменение пьезомодулей d_{33} и d_{31} от внешних факторов, можно считать, что

$$\frac{K_{з,i}}{K_{з,0}} = \sqrt{\frac{d_{33,i}}{d_{33,0}}} = \sqrt{\frac{k_i}{k_0}}, \qquad (1)$$

где $K_{з,i}$, $K_{з,0}$ – текущее и первоначальное значения коэффициентов преобразования;
$d_{33,i}$, $d_{33,0}$ – текущее и первоначальное значения пьезомодуля;
k_i, k_0 – текущее и первоначальное значения калибровочного коэффициента.

Сравнение результатов корректировки температурного изменения коэффициента преобразования по заряду при тестировании преобразователей, полученных по формуле (1), с результатами непосредственных измерений показали их совпадение в пределах 1,2–1,7 %, что не выходит за пределы погрешности измерений. Следует отметить, что корректировка коэффициента преобразования по напряжению по результатам тестирования, на практике не является простой задачей. Это объясняется его дополнительной зависимостью от характера изменения диэлектрической проницаемости и значения емкостной нагрузки [4].

Список литературы

1. Цеханский К. Р., Васильева Р. В. Датчики для контроля динамических параметров современных энергетических установок // Вибрационная техника. – М.: МДНТП, 1983. – С. 3–9.

2. . Янчич В. В., Иванов А. А., Орехов В. С. и др. Способы проверки и калибровки пьезоэлектрических акселерометров с изгибными элементами // Труды VI Международной науч.-техн. конф. «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». – Ростов н/Д: Изд-во Рост.гос. педагогического ун-та, 2008. – С. 176–179.

3. Цеханский К. Р., Войтенко В. Б., Кудинов А. П.Влияние температуры на встроенную систему контроля исправности пьезоэлектрического датчика вибрации // Вибрационная техника. – М.: МДНТП, 1988. – С. 101–104.

4. Янчич В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – (Пьезоэлектрическое приборостроение Т. 7). – 304 с.

ИССЛЕДОВАНИЕПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРО-ВЕНТИЛЯТОРА (MB)MURATAMZB1001T02

Е. С. Алексюнин

НКТБ Пьезоприбор ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

В последни годы всё большую популярность приобретают пьезоэлектрические устройства нового типа – пьезоэлектрические вентиляторы. Если вееноводобныепьезовентиляторы сравнительно давно известны и описаны то MB **MURATAMZB1001T02**были разработаны и начали серийно выпускаться лишь в последние годы. В сравнении с вентиляторами вращательного типа, пьезо MB обладают рядом существенных преимуществ:

- малые габариты;
- простота конструкции;
- представляют собой малошумящие устройства;
- малое тепловыделение;
- длительный срок службы;
- отсутствуют электромагнитные помехи;
- стойкость к агрессивным средам;
- низкое электропотребление.

В статье описываются результаты измерений серийного МВи приводится анализего моделирования с помощью метода конечных элементов в системе инженерного анализа ANSYS.

Рассматриваемый МВ построен на основе пьезоэлектрического излучателя типа полупассивного дискового биморфа (состоит из двух пластин с клееных между собой, одна из пластин пьезокерамическая поляризованная по толщине). Из-за малых габаритов сама по себе пластина биморфа не может создавать эффективный воздушный поток. На рис. 1 показана деформированная конструкция биморфа в точке с максимальной амплитудой колебаний. На рис. 2 представлен график АЧХ для биморфаиспользуемого в рассматриваемой конструкции.

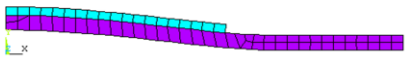


Рис. 1. Колебания закреплённого биморфа

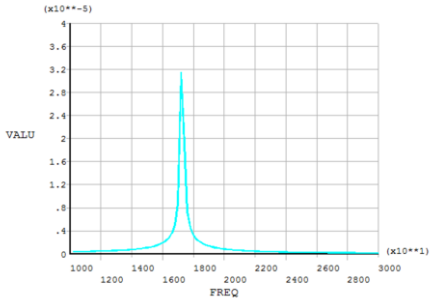


Рис. 2. АЧХ закреплённогобиморфа

Для эффективного сравнения МВ различных конструкция необходимо выявить набор критериев сравнения. В качестве критериев для оценки МВ построенного на основе пьезо-электрического излучателя следует рассматривать следующие параметры:

- рабочая частота устройства;
- потребляемая мощность (вместе с задающим генератором);
- производительность.

Основным критерием оценки микро-вентилятора (МВ) является его производительность. Под производительностью данного прибора, надо понимать скорость ротации воздушных масс между заданным объёмом и внешней средой.

Простейшим устройством для определения производительности МВ, является устройство основанное на принципе сообщающихся сосудов. Эксперимент по определению производительности будет состоять из замера объёма перемещённой жидкости из сосуда А в сосуд Б (рисунок 3) и замера времени за которое было произведено перемещений. Избыточное давление будет создаваться потоком воздуха перегоняемым МВ.

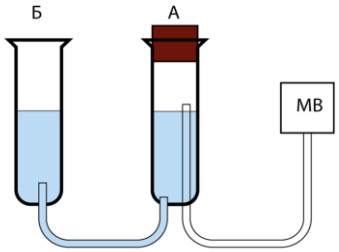


Рис.3. Схема устройства для определения производительности МВ

Для примера использования выбранных критериев предлагается рассмотреть характеристики МВ MZB1001T02 производства компании MURATA.Для данного устройства заявлены характеристики представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Параметр	**Значение**
Частота резонанса	24-27 кГц
Скорость потока	0,70 л/мин
Статическое давление	1,42 кПа
Рабочее напряжение	10–20 в.

На первом этапе следует провести измерение физических характеристик задающего элемента, т.е. биморфа. На рисунках 4 и 5 представлены график полной проводимости и фазово-частотная характеристика устройства.

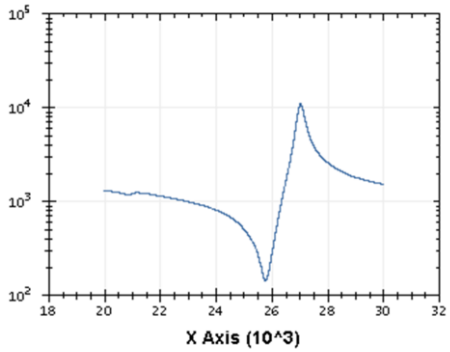


Рис. 4. Импеданс исследуемого МВ

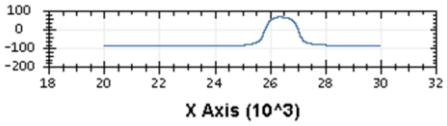


Рис. 5. ФЧХ исследуемого МВ

В таблице 2 представлены измеренные физические характеристики микро-вентилятора.

Таблица 2.

Параметр	**Значение**
Ёмкость C (pF):	$5{,}52 * 10^{-9}$
tg(delta):	$8{,}64 * 10^{-3}$
Добротность:	90
Коэф. связи:	0,29
Частота резонансы (кГц):	25,79
Частота анти-резонанса (кГц)	27,03

Рабочее напряжение данного устройства (с задающим генератором) равно 20 В. Измеренная скорость потока составила 0,64 л/мин.

Вычислительный аппарат на базе конечных элементов, используемый в новых версиях ANSYSпозволяет построить модель (рис. 6) воздушных потоков порождённых колебаниями пьезоэлектрического устройства.

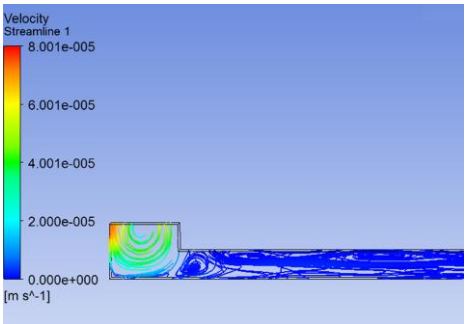


Рис. 6. Распределений скоростей воздушного потока в МВ

В заключении этой статьи следует отметить что на данный момент МВ построенные на базе биморфов являются малоизученной областью пьезоэлектрического приборостроения. Результаты исследования данной области пьезоэлектрического приборастроения могут найти применение в различных отраслях промышленности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЬЕЗОМОДУЛЯ НА ОБРАЗЦАХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С НЕВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

В.Л. Земляков, Ю. Урокова

Южный федеральный университет, Ростов н/Д, Россия

Для оценки качества пьезокерамического материала часто используют его пьезомодуль.

Широко распространенным методом, используемым для измерения пьезомодуля d_{ij}, является метод «резонанса–антирезонанса» [1], который предполагает первичные измерения в трех частотных областях: измеряется частота резонанса ω_p, измеряется частота антирезонанса ω_a и на частотах много ниже резонанса измеряется емкость пьезокерамического элемента (ПКЭ) C^{T}.

Математической основой этого метода служат выражения для комплексной проводимости, полученные из решения электромеханической задачи. Основным допущением метода является пренебрежение всеми видами потерь энергии, и в соответствии со стандартом [1] частоты ω_p и ω_a определяются как частоты максимума ω_m и минимума ω_n модуля проводимости ПКЭ.

В силу указанного допущения метод «резонанса–антирезонанса» дает хорошие результаты при измерениях пьезомодуля на образцах ПКЭ с малыми механическими потерями и высокой добротностью Q (Q>100), а при меньших значениях добротности появляется методическая погрешность определения пьезомодуля, поскольку частота ω_m понижается, а частота ω_n наоборот повышается. Это приводит к тому, что резонансный промежуток, определяемый по модулю проводимости разностью $\omega_n - \omega_m$ расширяется. В [1, п. 4.7.2.9] отмечено, что происходит завышение величины резонансного промежутка в $(1+1/k^2Q^2)$ раз, где k – коэффициент электромеханической связи пьезоматериала.

Пьезоматериалы ЦТС-19, ЦТС-26, ЦТС-36, ЦТСНВ-1, а также ряд их новых модификаций имеют добротность ниже 100 и применение для них стандартного метода «резонанса–антирезонанса» приводит к дополнительной методической погрешности определения их пьезомодуля.

Для определения математической зависимости между пьезомодулем и первичными измеряемыми параметрами для ПКЭ с невысокой добротностью (Q<100) можно воспользоваться новым подходом к определению пьезомодуля [2], согласно которому пьезомодуль связан с динамической емкостью C или индуктивностью L эквивалентной электрической схемы ПКЭ соотношением:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij}\frac{1}{\omega_p^2 L} = \beta_{ij}\, C. \qquad (1)$$

Константа зависит от упругих свойств материала и геометрии ПКЭ. Например, для образца в виде стержня

$$\beta_{31}^c = \frac{\pi^2}{8}\,\frac{t}{wl}\,S_{11}^E,$$

где l, w, t – соответственно длина, ширина и высота стержня, S_{11}^E – компонента упругой податливости.

Ранее эквивалентная электрическая схема, представляющая собой емкость C_0, параллельно которой подключена динамическая ветвь в виде цепочки из последовательно соединенных R, L, C элементов, использовалась для того, чтобы приближенно определять свойства ПКЭ. Теперь она используется для решения измерительных задач.

Рассмотрим возможность определения емкостиC используя те же первичные измерения, что и в методе «резонанса–антирезонанса».

Для ПКЭ с высокой добротностью емкостное отношение r_cопределяется формулой:

$$r_c = \frac{C_0}{C} = \frac{\omega_p^2}{\omega_a^2 - \omega_p^2}\ . \qquad (2)$$

Учитывая, что, $C^{\text{т}} = C_0 + C$ емкость динамической ветви эквивалентной электрической схемы записывается в виде

$$C = C^{\text{т}}/(r_c + 1) = C^{\text{т}}\left(\omega_a^2 - \omega_p^2\right)/\omega_a^2 \qquad (3)$$

Общую формулу для r_c возьмем из работы [3], в которой приводится связь между параметрами элементов эквивалентной электрической схемы и значениями модуля проводимости ПКЭ $|Y_m|$ и $|Y_n|$ соответственно на частотах ω_m и ω_n:

$$r_c = \frac{C_0}{C} = \frac{\left(1 + \frac{4}{M^2}\right)^{1/2}}{\left(\frac{\omega_n}{\omega_m}\right)^2 - 1}, \tag{4}$$

где коэффициент качества M определяется формулой:

$$M = \frac{\left(\frac{|Y_m|}{|Y_n|}\frac{\omega_n}{\omega_m}\right)^2 - 1}{\left[\left(\left(\frac{|Y_m|}{|Y_n|}\frac{\omega_n}{\omega_m}\right)^2 + \frac{|Y_m|}{|Y_n|}\right)\left(\frac{|Y_m|}{|Y_n|} + 1\right)\right]^{1/2}}.$$

При высокой добротности формула (4) переходит в (2).

Представленные соотношения позволяют записать математическую зависимость между пьезомодулем и первичными измеряемыми параметрами $C^{\text{т}}$, ω_m и ω_n:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} C^{\text{т}} / (r_c + 1), \tag{5}$$

в которой используются соотношения (2) или (4): использование (2) аналогично первичным измерениям в методе «резонанса–антирезонанса»; использование (4) позволяет расширить область применения метода «резонанса–антирезонанса» на ПКЭ с невысокой добротностью.

Чтобы оценить влияние величины механической добротности на точность определения динамической емкости, когда емкостное отношение r_c определяется по формулам (2) или (4) приведем результаты компьютерного моделирования для эквивалентной электрической схемы ПКЭ. Величину добротности будем менять путем изменения величины активного сопротивления.

Зависимость относительной погрешности Δ% определения динамической емкости от величины добротности приведена на рис. 1. Линия 1 соответствует расчетам по формуле (4), линия 2 – формуле (2).

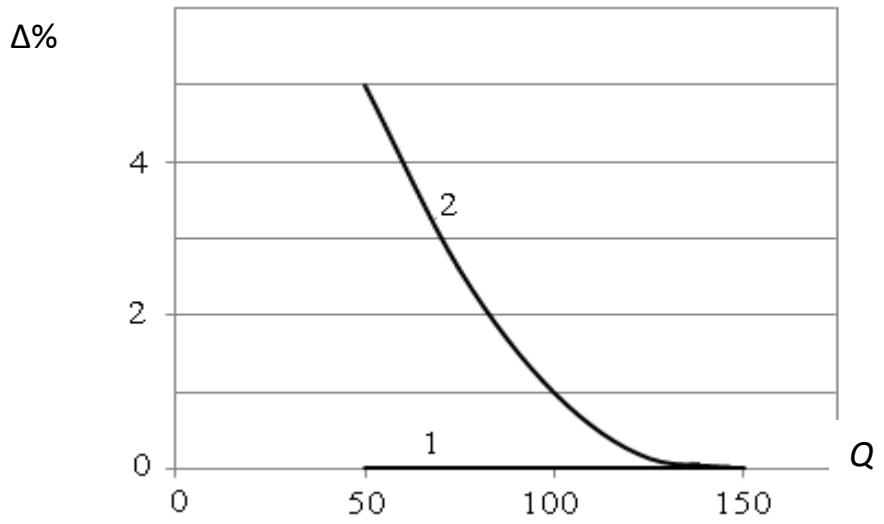


Рис. 1. Зависимость погрешности определения динамической емкости от величины добротности

Экспериментальные исследования проводились на образце ПКЭ из пьезоматериала ЦТС-19 в форме стержня длиной l=11$мм$, шириной w=4$мм$, высотой t=4,5$мм$. Добротность Q=58. Результаты измерений и значение пьезомодуля представлены в табл. 1. Значение $d_{31a\text{-}p}$ соответствует традиционному методу «резонанса–антирезонанса», d_{31} – значение пьезомодуля без методической погрешности.

Табл. 1

Результаты измерений и значение пьезомодуля

C^T, *пФ*	$f_р$, *кГц*	$f_а$, *кГц*	S^Ex10^{-13}, $м^2/н$	$d_{31a\text{-}p}$ x10^{-12}, *к/н*	*M*	d_{31}x10^{-12}, *к/н*
114	134,88	143,87	150	162	7,2	155

Список литературы

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987.
2. Земляков В.Л., Земляков В.В Новый подход к измерению пьезо-модуля пьезокерамических материалов в динамическом режиме. // Измерительная техника, 2002, № 4, с. 52−55.
3. Martin G.E. Determination of equivalent-circuit constants of piezoelectric resonator of moderately low Q by absolute-admittance measurements. // JASA, 1954, № 3, P. 413−420.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ ЛАЗЕРА

И.О. Соленова

Южный федеральный университет, г. Ростов на-Дону

Для стабилизации оптической оси лазера перспективным является применение пьезодвигателей. В связи с этим в докладе рассмотрено построение их моделей и компьютерное моделирование в системе MatLab.

Рассмотрим пьезоэлектрический элемент поперечного сечения $S_0 = l_0 b$ закрепленный одним концом на неподвижном основании, первоначальный размер l_o которого изменяется под действием электрического поляE(рис.1). Кроме исполнительного органа перемещаются также элементы объема активной части пьезоэлемента массой $m_{эф}$,

$(m_{эф} = m/3)$. Кроме этого значение суммарной приведенной подвижной массы m_Σ, включает в себя массу ротора M и часть массы пьезоэлемента m_k.

Основное динамическое усилие действует на пьезоэлемент в направлении перпендикулярном направлению приложенного поля. Поэтому воспользуемся уравнениями прямого и обратного пьезоэффекта. Умножив все члены последнего на YS_o, получим:

$$\frac{\Delta l \cdot Y \cdot S_o}{l_0} = -d_{31} \cdot E \cdot Y \cdot S_0 - \sigma \cdot S_0,$$

где Y– модуль Юнга, E – напряженность электрического поля, d_{ij} – пьезомодуль, σ – механическое напряжение в образце.

Обозначим: $d_{31} \cdot E \cdot Y \cdot S_0 = F_э$– усилие, вызванное электрическим полем, $\frac{\Delta l \cdot Y \cdot S_0}{l_0} = F_{упр}$ – усилие упругой деформации, $\frac{Y \cdot S_0}{l_0} = K_y$ – коэффициент упругости, $\sigma \cdot S_0 = F_{дин}$ – динамическое усилие

$$\overrightarrow{F_{упр}} = \overrightarrow{F_э} + \overrightarrow{F_{дин}} \quad (1)$$

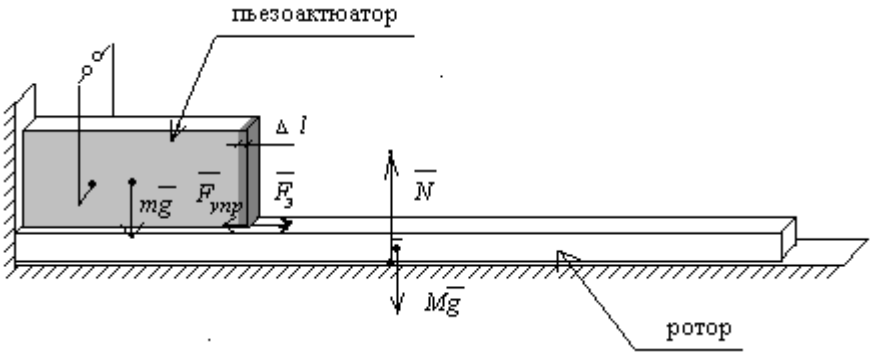


Рис.1.

Динамическое усилие здесь будет равнодействующей силой. $F_{дин} = m_\Sigma \cdot \frac{d^2\Delta l}{dt^2}$, где $m_\Sigma = M + m_{эфф} = M + \frac{m}{3}$.

Отсюда:

$$\overrightarrow{F_{дин}} = \overrightarrow{F_э} + \overrightarrow{F_{упр}} + \vec{N} + m\vec{g} + M\vec{g}, \quad (2)$$

В проекциях на оси:

$$m_\Sigma \cdot \frac{d^2\Delta l}{dt^2} = d_{31} \cdot E \cdot Y \cdot S_0 - \frac{\Delta l \cdot Y \cdot S_0}{l_0}$$

$$\frac{d^2\Delta l}{dt^2} = \frac{d_{31} \cdot E \cdot Y \cdot S_0}{m_\Sigma} - \frac{\Delta l \cdot Y \cdot S_0}{l_0 \cdot m_\Sigma}$$

Выполняя математические преобразования (2), получим полную систему дифференциальных уравнений, описывающих пьезоактюатор с ротором:

$$\begin{cases} \frac{dF_э}{dt} = \frac{\mathcal{E}_n \cdot K_0 - F_э}{R_{вн} C_0} - \frac{K_n \cdot K_0}{C_0} v \end{cases}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d_{31} \cdot E \cdot Y \cdot S_0}{m_\Sigma} - \frac{\Delta l \cdot Y \cdot S_0}{l_0 \cdot m_\Sigma}$$

$$\frac{d\Delta l}{dt} = v$$

Получив преобразование по Лапласу этих уравнений, можно получить структурную схему и передаточную функцию пьезоактюатора.

Его полная структурная схема показана на рис. 2.

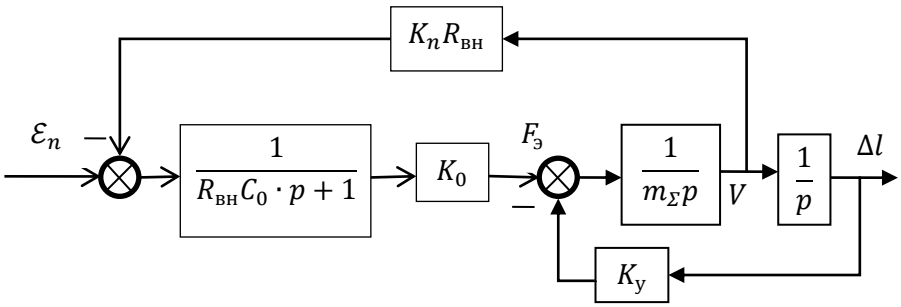


Рис. 2.

Из неё получаем передаточную функцию.

$$W = \frac{K_0 / K_у}{\frac{R_{вн} C_0 m_\Sigma}{K_у} p^3 + \frac{m_\Sigma}{K_у} p^2 + \frac{(K_n R_{вн} K_0 + K_у R_{вн} C_0)}{K_у} p + 1}$$

Последнее выражение характеризует зависимость хода пьезоактюатора от электрического напряжения.

Результаты моделирования пьезоактюатора на основе материала ЦТС-Ст3 представлены на рисунках: рис. 3, *а* – переходная характеристика, рис. 3, *б* – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

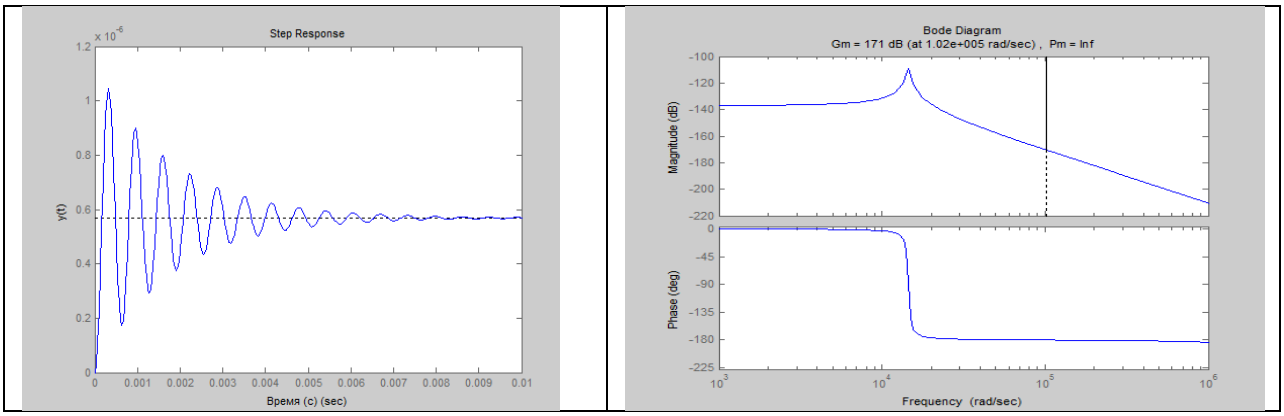


Рис.3.

Исходя из представленных результатов, можно сделать вывод о возможности использования пьезодвигателей в системе стабилизации оптической оси лазера.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКОНТУРНОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА

С.А. Толмачев

Южный федеральный университет, г. Ростов на-Дону

Представленная работа является продолжением [1].

Если пьезоэлемент характеризуется многоконтурной схемой (рис. 1),

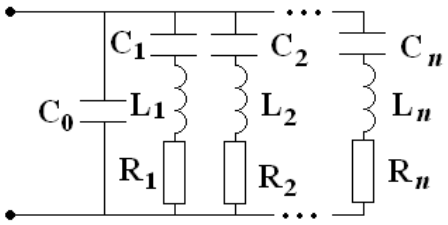


Рис. 1. Эквивалентная многоконтурная схема ПКЭ

то зависимости активной части проводимости от частоты будет описываться многорезонансной кривой

$$G(\omega)=\sum_i \frac{R_i}{R_i^2+\left(\omega L_i-\dfrac{1}{\omega C_i}\right)^2}$$

На рис. 2 показан примерный вид двухрезонансной кривой $f(x)$.

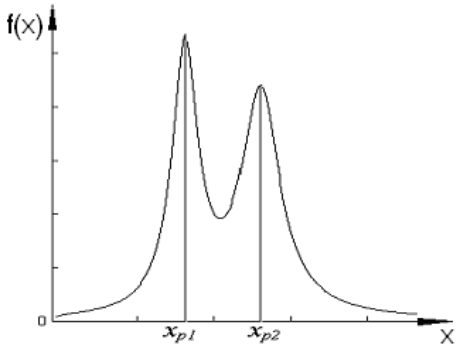


Рис. 2. Примерный вид двухрезонансной кривой

Некоторые результаты работы процедуры *fminsearchulsqnonlin*приведены в табл. 1. По сравнению с процедурой оптимизации параметров для однорезонансной кривой данной процедуре требуется в 1,5-3 раза больше времени. Количество требуемых итераций для поиска параметров двухрезонансной кривой требуется в 3-30 раз больше, чем для однорезонансной.

Таблица 1

Сравнение *fminsearch* и *lsqnonlin* для двухрезонансной кривой

Двухрезонансная кривая					
		FuncCount	Iterations	Time	Max error
fminsearch	0%	1282	802	0,5470	0
	5%	1338	796	0,5930	1,2592
	10%	1084	615	0,5000	5,0285
lsqnonlin	0%	442	63	0,8590	1,8077
	5%	589	84	0,8130	1,1247
	10%	1030	147	1,1410	5,1480

То же самое можно сказать и о максимальном количестве обращений к оптимизируемой функции. Это объясняется увеличением оптимизируемых параметров: если для однорезонансной кривой требуется оптимизация по трем параметрам, то для двухрезонансной кривой уже по шести.

Функции *lsqnonlin* количество требуемых для нахождения решения итераций и максимального обращения к процедуре вычисления целевой функции возрастает с увеличением ошибки измерений. Соответственно, время поиска решений с помощью *lsqnonlin* увеличивается с ростом ошибки er. При er = 10% количество обращений к целевой функции сравнимо с количеством обращений *FuncCount* метода *fminsearch*.

Противоположная зависимость наблюдается для функции *fminsearch*, где количество требуемых итераций уменьшается с увеличением ошибки измерения, однако увеличивается погрешность вычислений.

Сравнение времени поиска решений с помощью функций *fminsearch* и *lsqnonlin* (табл. 2) приводит к результату, аналогичному для однорезонансной кривой: *fminsearch* требует меньше времени, чем *lsqnonlin*. Функция *fminsearch* находит решения с меньшей погрешностью, то есть, более точно, чем *lsqnonlin*.

Таблица 2

Время поиска решений в зависимости от расстояния между максимумами

		R1	L1	C1	R2	L2	C2	Time
Теоретич.	большое1	120	12	650	100	10	600	
	среднее2	120	11	600	100	10	600	
	небольшое3	100	11	600	100	11,5	600	
fminsearch	1	120	12	650	100	10	600	0,3130
	2	120	11	600	100	10	600	0,3440
	3	100	11	600	100	11,5	600	0,6410
lsqnonlin	1	120,0082	11,9934	650,3580	99,9987	10,0163	599,0236	0,4060
	2	120,0338	10,7250	615,3840	100,0121	10,0124	599,1988	0,5470
	3	100,3971	11,0349	598,0529	99,9180	11,3606	607,3275	1,7650

Еще одной из проблем решения данной задачи является расстояние между максимумами двухрезонансной кривой. Одним из параметров, на котором отражается влияние данной проблемы, является время нахождения параметров функции. Как видно из таблицы 5, с увеличением расстояния между «горбами» уменьшается время расчета искомых параметров.

Необходимо отметить, что для увеличения скорости сходимости задачи оптимизации

существенным моментом является правильное задание начальных условий. Так в вышеприведенных примерах они были найдены как приблизительные значения *R, L, C,* полученные из экспериментальных данных путем известных зависимостей [2].

Список литературы

1. НерубальскийВ.Ю. Применение методов оптимизации для определения параметров одноконтурной эквивалентной схемы пьезоэлемента. // настоящий сборник
2. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под. Ред. С.И. Пугачева. Л.: Судосроение, 1984. – 356 с.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.В. Пешиков

Южный федеральный университет, г. Ростов на-Дону

Метод «резонанса-антирезонанса» находит широкое распространение в практике экспериментального исследования пьезокерамических элементов (ПКЭ) и составляет основу современного стандарта на измерение параметров пьезоматериалов [1]. Он реализуется по следующей рекомендуемой стандартом схеме измерений (рис. 1):

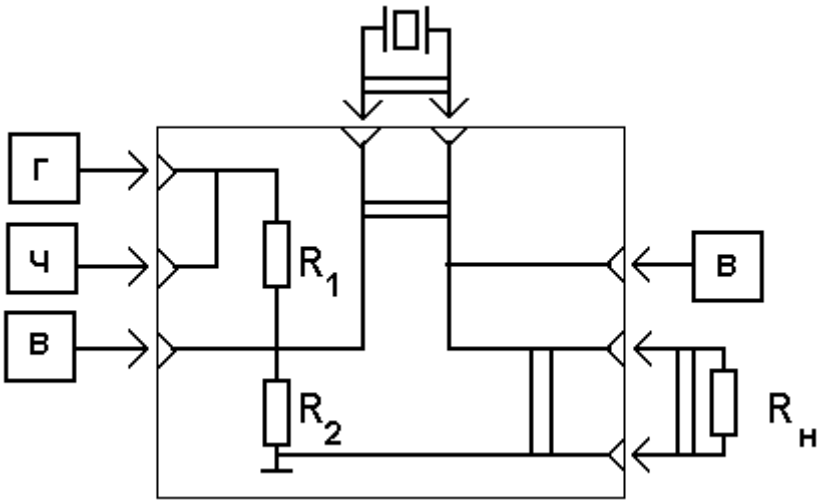


Рис. 1. Стандартная схема измерений

Введены обозначения: Г – генератор, Ч – частотомер, В – вольтметр, делитель сопротивлений R_1 и R_2 отделяет генератор от схемы измерений, сопротивление $R_н$ должно быть много меньше R.

Основными достоинствами метода служат: простота и доступность математического и аппаратного обеспечения; высокая точность определения характеристических частот и рассчитываемых по ним упругих констант.

В [1] представлена обобщенная формула метода «резонанса–антирезонанса» для определения пьезомодуля ПКЭ различной формы, которая получена из решения электромеханической задачи:

$$d_{ij} = \frac{\mathrm{A}*10^{-6}}{\sqrt{\rho} f_p D} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon^{\mathrm{T}}}{\varepsilon_0}\right) \frac{\delta_r}{1+\mathrm{B}\delta_r}}, \quad (1)$$

где $\delta_r = \frac{f_a - f_p}{f_p}$ – относительный резонансный промежуток, A, B – некоторые коэффициенты, D – частотнозадающий размер (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты для определения пьезомодуля

d_{ij}	Форма ПКЭ	A	B	D
d_{31}	диск	1,91	1,45	диаметр
	пластина	1,60		сторона
	брусок	2,34	1,47	длина
d_{33}	столбик		1,53	
d_{15}	пластина			толщина

В докладе представлены результаты разработки программного обеспечения для обработки данных экспериментального исследования ПКЭ.

Целью разработки программного обеспечения является автоматизация обработки результатов измерений параметров ПКЭ и вычисления их основных и дополнительных параметров.

Для разработки была выбрана среда программирования Delphi 7.0.

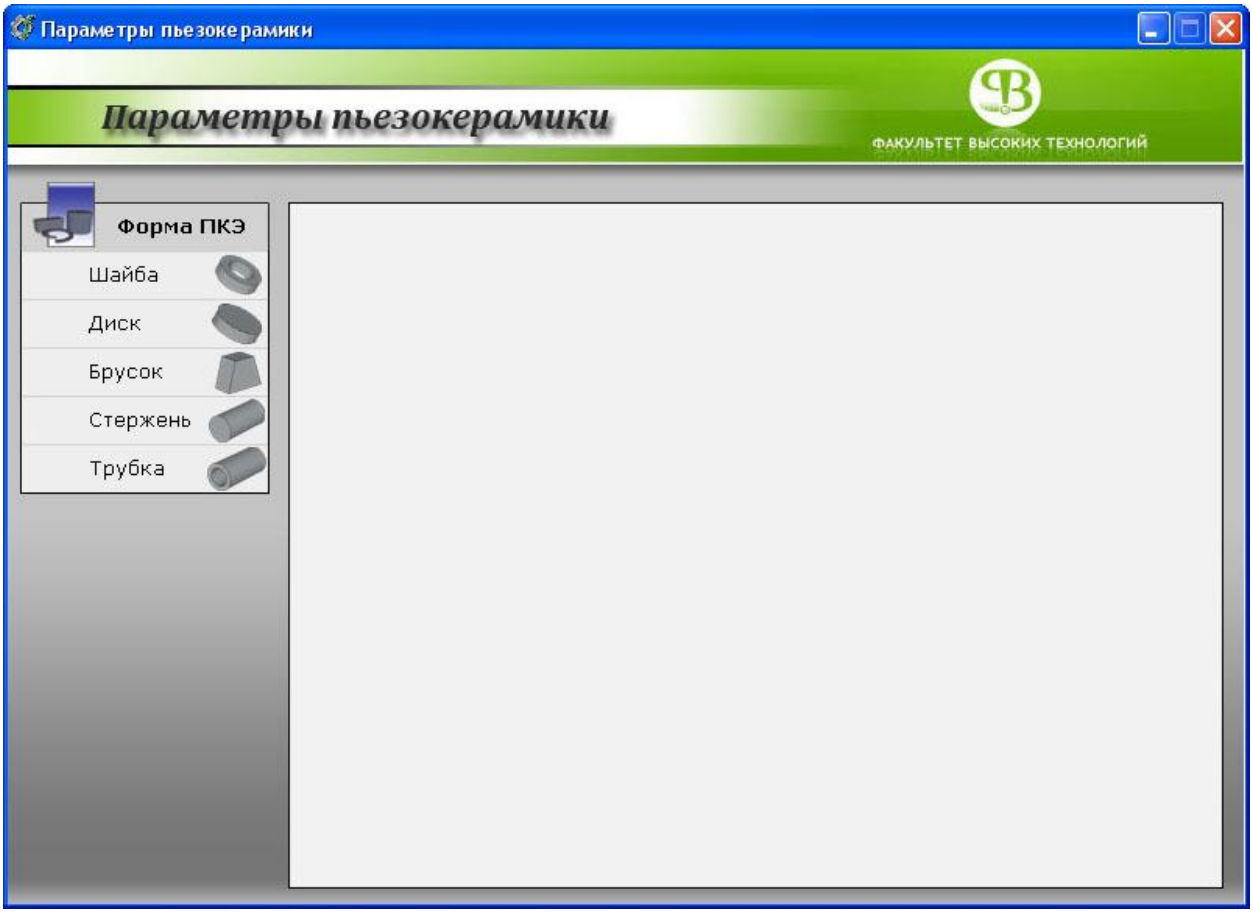


Рис 2. Исходный вид программы при запуске

Интерфейс программы представлен несколькими блоками. Первый блок – меню выбора формы пьезокерамического элемента. В данном меню доступны 5 вариантов формы: шайба, диск, брусок, стержень и трубка. Для выбора нужного значения необходимо нажать на соответствующую надпись. Следующий блок – блок исходных

данных. При запуске программы этот блок не отображается на экране до момента выбора формы ПКЭ. Блок исходных данных состоит из графического изображения модели выбранного ПКЭ, таблицы ввода исходных данных и кнопок «Очистить» и «Рассчитать». Графическая модель ПКЭ отображается с обозначенными геометрическими размерами для удобства их ввода в таблицу исходных данных. Таблица ввода исходных данных представлена следующими столбцами: «Обозначение» (условное обозначение параметра), «Расшифровка» (полное название параметра), «Значение», «Единица измерения» и поле проверки правильности введенных данных (если данные введены правильно, то в этом поле отображается зеленый круг). Поле «Значение» доступно для редактирования и служит для ввода исходных данных, остальные поля доступны только для чтения. Для того, чтобы очистить столбец «Значение» необходимо нажать на кнопку «Очистить», которая активна только в случае если столбец «Значение» не пуст. Для того чтобы получить результат необходимо нажать на кнопку «Рассчитать», которая активна когда столбец проверки правильности введенных данных показывает что все поля заполнены верно. Заключительный блок – блок результатов. Так же как и блок исходных данных, блок результатов не отображается на экране до тех пор, пока не выбрана форма ПКЭ. Данный блок содержит обозначения и расшифровку искомых параметров и поля для отображения их значений. Поля заполняются при нажатии на кнопку «Рассчитать» блока исходных данных. В случае изменения формы ПКЭ поля с результатами очищаются. Следует также отметить, что количество исходных данных и искомых параметров может отличаться для различных форм ПКЭ.

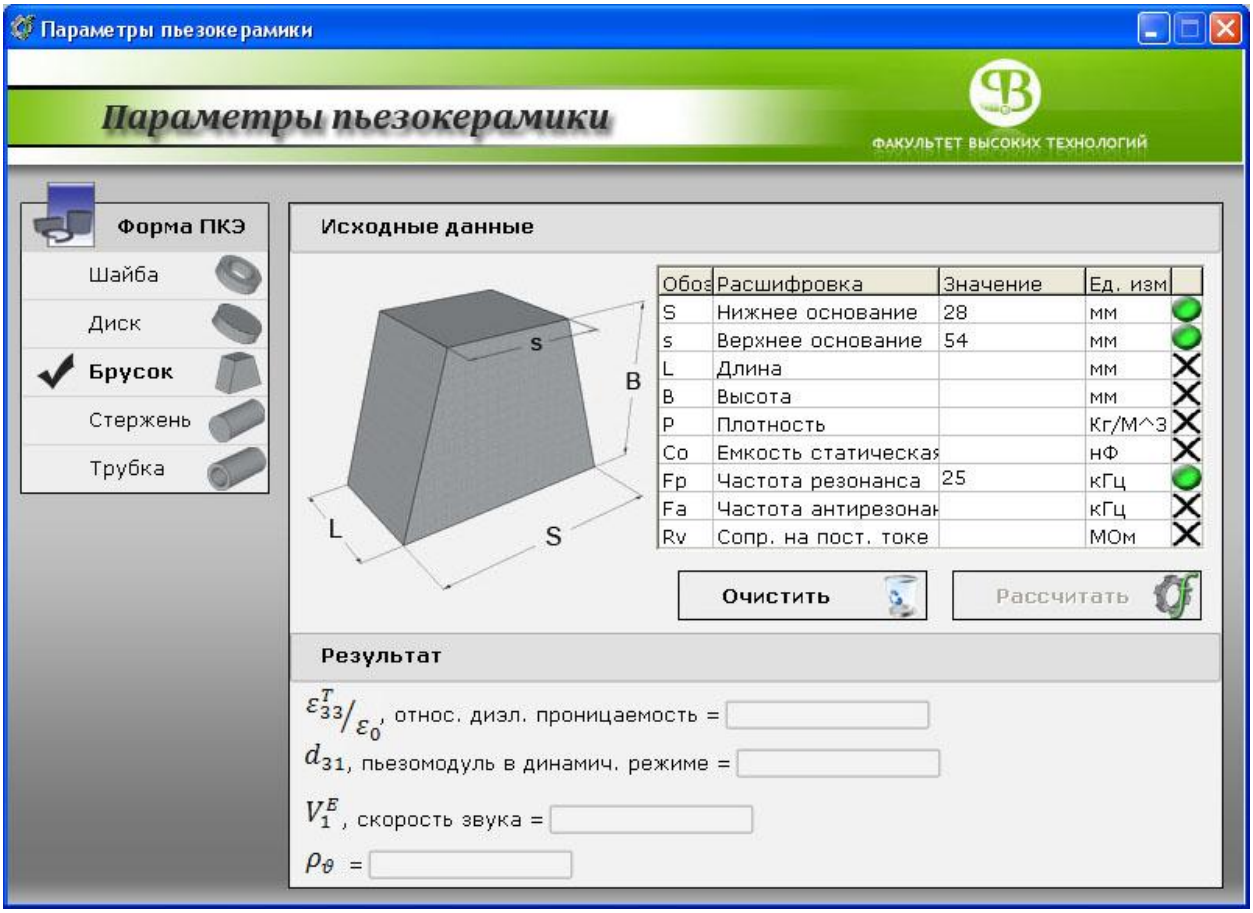


Рис 3. Вид окна программы в процессе ввода исходных данных

Список литературы

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. Введен 01.01.88. – М.: Электростандарт, 1987. – 141 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОДНОКОНТУРНОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА

В.Ю. Нерубальский

Южный федеральный университет, г. Ростов на-Дону

В MatLab заложен ряд функций оптимизации, которые реализуют различные численные методы [1,2]. Рассмотрим применение функций *fminsearch* и *lsqnonlin* для решения задачи определения параметров одноконтурной эквивалентной схемы пьезоэлемента.

В функции *fminsearch* используется метод Нелдера-Мида [3]. Преимуществом этой функции является возможность её использования для негладких целевых функций.

Форма обращения к функции имеет вид: **x = fminsearch(fun, x_0, options, p_1, p_2,…).**

Функция l*sqnonlin* применяется в тех случаях, когда целевая функция имеет вид $F = 1/2 \cdot \sum f_i^2$. В этом случае градиент g и гессиан H функции F выражаются через якобиан J вектор-функции $f = \left| f_1, f_2, \ldots, f_m \right|'$: $g = J'*f; \quad H = J'*J + R.$

Остаточный член R включает вторые производные от F , но в окрестности минимума им обычно пренебрегают по сравнению с $J' * J$. Это дает возможность не вычислять вторые производные, что значительно ускоряет работу.

Система уравнений для отыскания вектора сдвига $H * p = -g$ при замене H на $J' * J$ превращается в $J' * J * p = -J' * f$. Это метод Гаусса-Ньютона [3].

В методе Левенберга-Марквардта [1] матрица $J' * J$ в левой части системы уравнений заменяется на $J' * J + \lambda * I$, где I – единичная матрица, а λ – некоторое неотрицательное число.

В функции *lsqnonlin* применяются оба метода: метод Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта.

В обращении x=lsqnonlin(fun,x_0) минимизируется сумма квадратов компонент вектора - столбца, который вырабатывает функцию fun (это может быть также матрица). Второй аргумент x_0 – стартовая точка для поиска.

При использовании функции l*sqnonlin*, в которой целевая функция является сверткой вектора, можно задавать ограничения. Для функции *lsqnonlin* доступны только простейшие ограничения типа $lb \le x \le ub$. Обращение к функции *lsqnonlin* в этом случае имеет вид: **x=lsqnonlin(fun, x_0, lb, ub, options, p_1,p_2,…).**

Как показано в работе [4] для пьезоэлемента, описываемого одноконтурной эквивалентной электрической схемой (рис. 1)

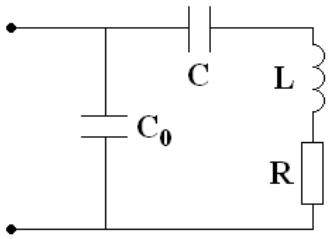


Рис. 1. Эквивалентная схема пьезоэлемента

справедливо соотношение для активной части проводимости:

$$G(\omega) = \frac{R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Зависимость активной части проводимости ПКЭ от частоты является однорезонансной кривой, то есть кривой $f(x)$ вида рис. 2.

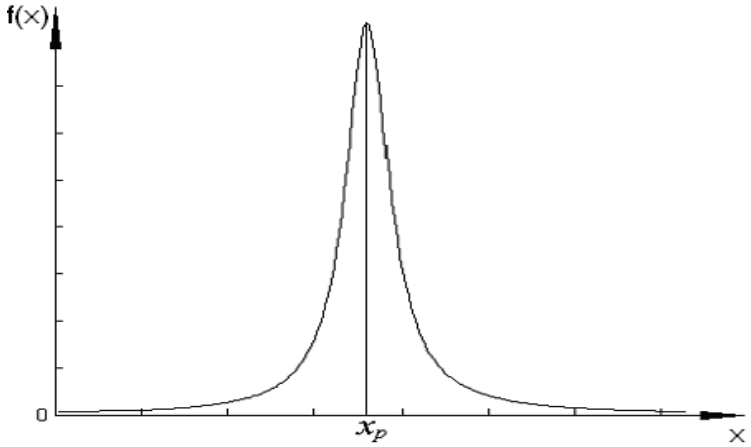


Рис.2. Однорезонансная кривая

Пусть с помощью серии экспериментальных измерений активной части проводимости пьезоэлемента были получены некоторые данные, которые соответственно наиболее точно описываются с помощью резонансных функций. Обозначим ω_i – точки, в которых сняты измерения, а $G(\omega_i)$ – результаты измерений, где i=1,2..n. Построим математическую модель, которая позволит проводить эксперименты для определенных параметров функции R, L, C с целью накопления экспериментальных данных.

На интервале [a,b] с шагом k формируется вектор ω, каждому значению которого ставится в соответствии значение $G(\omega)$. Вследствие влияния на любую систему внешних воздействий невозможно получить результаты опытов без погрешностей, поэтому с целью приближения к реально получаемым экспериментальным данным внесем некоторую ошибку **er** в измерения. Обычно ошибка измерений составляет 5%. Для этого сконструируем вектор **pogr**, с помощью которого построим «эмпирические» данные.

В табл. 1 приведены результаты работы процедуры, реализующей оптимизацию параметров однорезонансной функции при ошибке измерений 0%. Критериями сравнения работы методов являются время работы программы, точность полученных результатов, а также количество итераций и используемых обращений к функции.

Таблица 1

Результаты работы процедуры fminsearch для однорезонансной функции при ошибке измерений 0%

Fminsearch, погрешность измерения 0%		MaxFuncEvalf								
TolX, TolFunc		100	500	1000	5000	10000	15000	20000	25000	30000
	1,E-05	0,1560	0,1560	0,1560	0,1410	0,1560	0,1560	0,1560	0,1560	0,1510
	1,E-10	0,1560	0,1720	0,1770	0,1720	0,1710	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720
	1,E-15	0,1400	0,1880	0,2500	0,7030	1,2650	1,7970	2,3280	2,9530	3,4220
	1,E-20	0,1570	0.2080	0,2660	0.7030	1,2500	1,8130	2,3600	2,8910	3,4530
	1,E-25	0,1560	0,1980	0,2810	0,7030	1,2500	1,7970	2,3590	2,8910	3,4530

При увеличении допустимого количества вычислений целевой функции с небольшой требуемой точностью результатов порядка 1e-5 время работы остается постоянным. Однако уже при точности более 1e-10 время расчета начинает расти с увеличением параметра MaxFuncEvalf. Таким ообразом, с увеличением максимального количества обращений к функции **mfs** увеличивается и точность вычислений.

Для сравнения точности вычислений, времени работы методов, количества итераций и обращений к функции ниже приведена табл. 2. При ошибке измерений 5% рассматриваемые методы совершают наименьшее количество итераций, обращений к функции, находят решение за наименьшее время. Время нахождения решений с помощью метода *lsqnonlin* больше времени, которое требуется для нахождения решения методу *fminsearch*.

Функция*lsqnonlin*требует в 6-50 раз меньшее количество итераций и обращений к функции ‘rew’, однако *fminsearch* находит решение с большей точностью и за меньшее время, чем *lsqnonlin*.

Таблица 2

Сравнение fminsearch и lsqnonlin для однорезонансной кривой

Однорезонансная кривая					
		FunCount	Iterations	Time	Max error
fminsearch	0%	331	174	0.1720	0
	5%	282	133	0.1560	0.8440
	10%	300	146	0.1880	0.3106
lsqnonlin	0%	17	4	0.2500	0.4530
	5%	13	3	0.2500	0.8711
	10%	49	12	0.2810	1.7970

Таким образом, если ограничивающим фактором нахождения решения является быстродействие и точность решений, то рационально воспользоваться методом деформируемого многоугольника (функция *fminsearch*). Однако при требовании наименьших затрат для решения задачи лучше применить методы второго порядка (функция *lsqnonlin*).

Список литературы

1. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 6.x.: программирование численных методов. // СПб.: БВХ-Петербург, 2004, 672 с.
2. Кондрашев В. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов. – М.: Мир, 2002. – 350 с.
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. –632 с.;
4. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под. Ред. С.И. Пугачева. Л.: Судосроение, 1984. – 356 с.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПРОВОДИМОСТИ

С.Н. Ключников

Южный федеральный университет, г. Ростов на-Дону

Пьезокерамические элементы широкое применяются в различных отраслях науки и техники в современном мире. Одним из распространенных применений этих элементов является их использование в качестве пьезорезонаторов, представляющих собой механическую колебательную систему с ярко выраженными резонансными свойствами, в которой механические колебания возникают за счет пьезоэфекта. Одним из важных параметров пьезорезонаторов как механической колебательной системы является их добротность.

Добротность является одной из основных характеристик пьезорезонаторов. Практически все применяемые методы для определения добротности являются динамическими, связанными с частотными измерениями в области резонанса.

Наиболее распространенный метод определения добротности заключается в том, что находится частота резонанса f_p и частотный диапазон контура $\Delta f = f_2 - f_1$ на уровне 0,5 от максимального значения активной составляющей проводимости (Рис. 1). А добротность в дальнейшем находится по формуле [1]:

$$Q_{\text{м}} = f_p / \Delta f \ . \qquad (1)$$

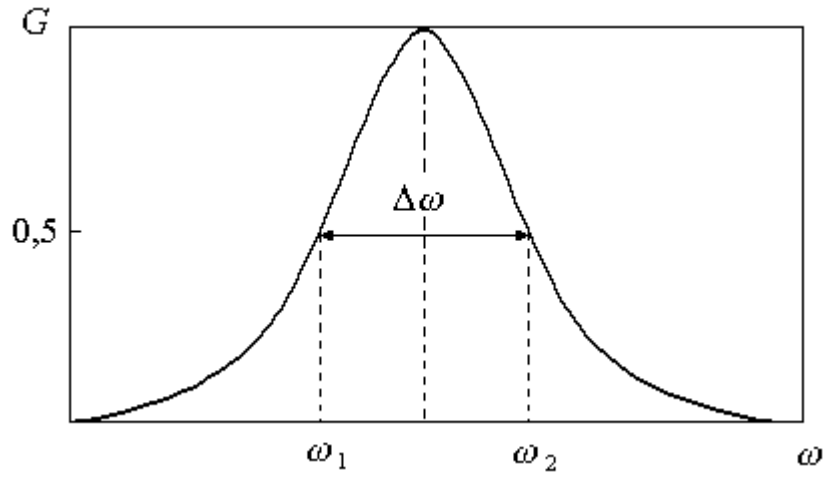


Рис. 1. Определение добротности по частотной характеристике активной составляющей проводимости

Для устранения недостатков этого метода, связанных с определением узких частотных промежутков, в работе [2] предложен метод определения добротности по

амплитудным измерениям активной составляющей проводимости. Показано, что добротность определяется формулой

$$Q_{\text{м}} = \frac{\pi}{4}\frac{\omega_p G^{|}(\omega_{\max})}{G\ (\omega_p)}, \qquad (2)$$

в которой $\omega_p = 2\pi f_p$ - частота резонанса, $G\ (\omega_p)$ - максимум активной составляющей проводимости на частоте резонанса, а $G^{|}(\omega_{\max})$ - максимальное значение производной от активной составляющей проводимости на частоте $\omega_{\max}$. Следовательно, для нахождения значения добротности должны быть найдены максимум активной составляющей проводимости и максимум ее производной.

Определим зависимость между значением активной составляющей проводимости на частоте резонанса и значением этой проводимости на частоте максимума:

$$G(\omega_{\max}) = \frac{1}{R\,(1+(\frac{(\omega_{\max}-\omega_p)}{(\omega_1-\omega_p)})^2)} = \frac{3}{4}G(\omega_p).$$

Тогда выражение (2) для добротности будет иметь вид

$$Q_{\text{м}} = 0{,}58\frac{\omega_{\max} G^{|}(\omega_{\max})}{G(\omega_{\max})}. \qquad (3)$$

Согласно формуле (3) определение добротности осуществляется по результатам измерений на одной частоте, соответствующей максимуму производной от активной составляющей проводимости.

Приведем результаты исследований по оценки границ применимости новых методов определения добротности, полученные путем компьютерного моделирование на модели эквивалентной электрической схемы ($Q_{исх}$).

Цели моделирования:

- подтверждение возможности применения новых методов для ПКЭ из стандартной керамики с добротность не менее 50;
- оценка минимального числа отсчетов по частоте *N* при измерении активной составляющей проводимости в области резонанса.

На рис. 2 представлены семейства кривых, характеризующих погрешность определения добротности тремя методами: 1 – метод, основанный на формуле (2), 2 – метод, основанный на измерении ширины резонансной кривой активной составляющей проводимости, 3 – метод, основанный на формуле (3), позволяющий определять добротность по измерениям активной составляющей проводимости на одной частоте в области резонанса, в зависимости от числа отсчетов по частоте в области, соответствующей ширине резонансной кривой активной составляющей проводимости на уровне 0,5. Погрешность определения величины добротности рассчитывалась по формуле

$$\Delta\% = 100\%\frac{\left|Q_{\text{м}} - Q_{исх}\right|}{Q_{исх}}.$$

Рис. 2*а* соответствует $Q_{исх} = 50$, рис. 2 *б* – $Q_{исх} = 100$, рис.2 *в* – $Q_{исх} = 200$.

Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

– минимальное число отсчетов по частоте *N* при измерении активной составляющей проводимости в области резонанса в ряде дискретных точек в диапазоне, соответствующем ширине резонансной кривой активной составляющей проводимости на

уровне 0,5 не менее 20 точек, при этом методическая погрешность определения добротности всеми тремя методами примерно одинакова и не превышает 1%;

– методическая погрешность определения добротности новыми методами при добротности ПКЭ 50 и выше составляет не более 1%.

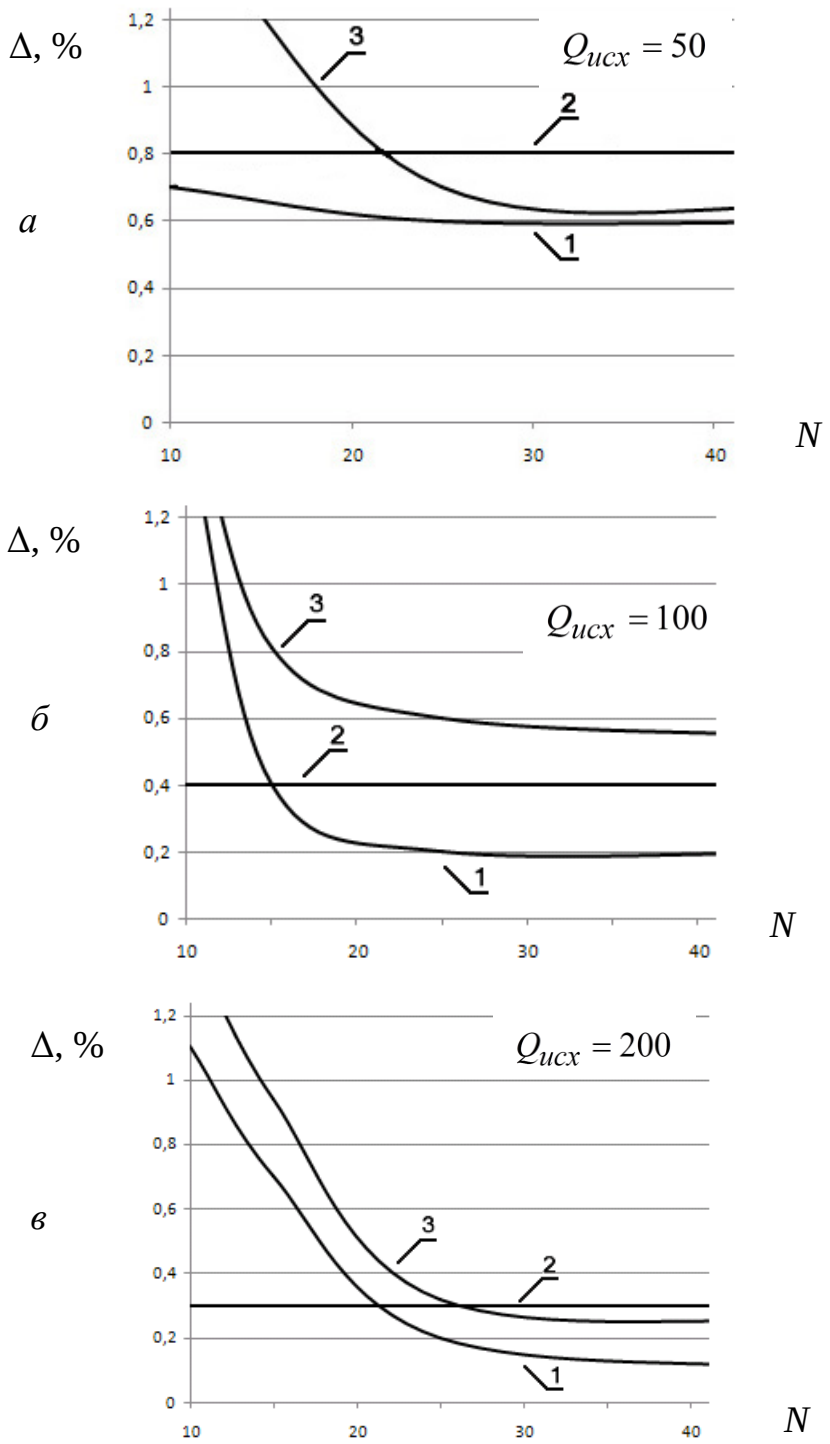


Рис. 2. Погрешность определения добротности в зависимости от числа отсчетов по частоте в области резонанса

Список литературы

1. Земляков В.Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография / В.Л.Земляков. − Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5.)

2. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям. // Измерительная техника, 2010, № 3, С. 38–40.

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫМ КОМПЛЕКСОМ НА ОСНОВЕ LABVIEW

С.Н. Ключников, Т.А. Бодрикова,

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Одна из важных задач, решаемых в пьезоэлектрическом приборостроении – выпуск идентичных по параметрам и качественных пьезокерамических элементов (ПКЭ). Поэтому проводится контроль изготавливаемых пьезоэлементов. Контроль осуществляется по какому либо параметру или набору параметров пьезоэлемента. Существуют различные методы определения параметров пьезоэлементов и пьезоматериалов. В докладе подробно рассмотрены методы определения добротности пьезоэлементов.

Также важно знать свойства пьезокерамического элемента преобразовывать электрическую энергию в механическую. Параметром, характеризующим этот процесс может выступать пьезомодуль материала ПКЭ. Для ПКЭ в форме стержня, столбика, шайбы или кольца, измерения пьезомодуля осуществляются относительно просто. Для элементов в форме диска ситуация более сложная, поскольку необходимо дополнительно проводить измерения частоты первого обертона, что не позволяет ограничиться измерениями только в области частот основного резонанса. В настоящее время для определения пьезомодуля рассчитывают коэффициент Пуассона σ, а также наименьший (первый) корень частотного уравнения η. Представляет интерес более простая аналитическая зависимость η от σ и преобразование формул к другому виду, в котором бы вообще отсутствовала зависимость от η и σ.

Квадрат пьезомодуля можно находить по формуле (1) по известной динамической емкости. Динамическую емкость можно находить, например, по формуле (2).

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{1}{\omega_p^2 L} = \beta_{ij} C \qquad (1)$$

$$C = \frac{1}{\omega_p R Q} \qquad (2)$$

То есть, динамическую емкость и квадрат пьезомодуля для ПКЭ известной геометрии, можно определить через произведение добротности и сопротивления пьезорезонатора на частоте механического резонанса.

В работе [3] показано, что для элементов форме диска расчет коэффициента β_{ij} можно производить по приближенной формуле:

$$\beta_{31}^{\partial} = 1{,}88 \frac{t}{\pi r^2} \frac{1}{\rho (\pi d f_p)^2}. \qquad (3)$$

Используя приближенную формулу (3) можно проводить определение пьезомодуля на образцах в форме диска по формуле (1) только по измерениям в области частот основного резонанса.

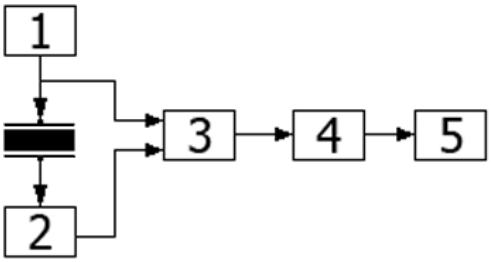
Если добротность определяется по результатам измерений на одной частоте, то квадрат пьезомодуля находится по

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \cdot 2{,}3 \cdot \frac{1}{\omega_{\max}^2} \cdot \frac{G(\omega_{\max})}{\dfrac{G^{|}(\omega_{\max})}{G(\omega_{\max})}}. \qquad (4)$$

На базе LabView был выполнен аппаратно-программный комплекс, в котором были реализованы рассмотренные методы определения параметров ПКЭ. Структурная блок схема, иллюстрирующая принцип работы комплекса реализующего метод определения добротности по амплитудным измерениям, показана на рис. 1.

В комплексе предусмотрена возможность задания частотного диапазона и количества точек измерения. При этом шаг по частоте будет изменяться автоматически. Графики отображаются в соответственных полях, нормированные на свои максимальные значения. При этом предусмотрена возможность трассировки по графику с отображением соответствующих значений X и Y в интересующей точке измерения.

Важной особенностью работы комплекса является синхронизация выхода и входа устройства. Это сделано для того чтобы исключить неконтролируемый сдвиг фазы. Поэтому выполняя синхронное детектирование, после перемножения сигнала воздействия и сигнала с ПКЭ, на выходе ФНЧ будем получать активную составляющую проводимости ПКЭ.



(1 – блок генерирования сигнала воздействия на исследуемый ПКЭ; 2 – блок приема сигнала с исследуемого образца; 3 – блок формирования активной составляющей проводимости; 4 – блок вычислений и обработки данных; 5 – блок отображения и графического представления данных)

Рис. 1. Структурная блок-схема работа комплекса

В LabView имеется возможность создания подпрограмм. Поэтому были созданы подпрограммы, реализующие алгоритмы нахождения добротности и пьезомодуля описанные выше. При выполнении подпрограммы нахождения добротности по амплитудным измерениям результат выдается сразу после того как определяется максимум активной составляющей проводимости и максимум ее производной. И нет необходимости проводить измерения во всем частотном диапазоне. Подпрограмма определяющая добротность по уровню 0,5 от максимального значения кривой активной составляющей проводимости определяет результат только после проведения измерений во всем частотном диапазоне заданном оператором.

С помощью разработанного устройства были проведены экспериментальные исследования на 3 образцах ПКЭ различной геометрической формы. В таблицах 1*а*-1*в* приведены результаты нахождения добротности для элементов форме стержня, кольца и шайбы соответственно в зависимости от числа точек измерений в области резонанса.

Таблица 1*а* Результаты нахождения добротности для элемента в форме стержня

Δf: 15798 Гц – 15826 Гц					
Кол-во точек	$Q_{0,5}$	$Q_{пр.}$	$\Delta_{пр.}$	$Q_{о.ч.}$	$\Delta_{о.ч.}$
20	627,46	588,56	6,1 %	612,14	2,4 %
40	618,05	597,42	3,3 %	610,52	1,2 %
60	614,5	596,48	2,9 %	610,37	0,7 %

Таблица 1*б* Результаты нахождения добротности для элемента в форме кольца

Δf:18329 Гц– 18369 Гц					
Кол-во точек	$Q_{0,5}$	$Q_{пр.}$	$\Delta_{пр.}$	$Q_{о.ч.}$	$\Delta_{о.ч.}$
20	509,69	473,98	7 %	490,73	3,8 %
40	488,01	480,79	1,5 %	488,784	0,16 %
60	482,87	480,808	0,4 %	487,02	0,8 %

Таблица 1*в* Результаты нахождения добротности для элемента в форме шайбы

Δf:23650 – 24050					
Кол-во точек	$Q_{0,5}$	$Q_{пр.}$	$\Delta_{пр.}$	$Q_{о.ч.}$	$\Delta_{о.ч.}$
20	66,25	59,98	9,46 %	60,99	7,9%
40	62,76	61,15	2,6 %	61,86	1,4 %
60	61,68	61,17	0,8 %	62,19	0,8 %

Для экспериментального исследования новых методов определения пьезомодуля исследования проводились на образце в форме стержня и диска. Пьезомодуль элемента в форме диска определялся без измерения частоты обертона по приближенным формулам. Результаты нахождения пьезомодуля представлены в таблицах 2*а*, 2*б*.

Таблица 2*а* Результаты нахождения пьезомодуля для элемента в форме стержня

Δf: 15798 Гц – 15826 Гц				
Кол-во точек	β_{ij} x10^{-10}, м/н	Аналог GBW метода	$d_{ij(о.ч.)}$	Δd_{ij}
		d_{31}x10^{-12}, к/н	d_{31}x10^{-12}, к/н	
40	2,224	187,84	178,86	4,78
60	2,224	188,21	182,99	2,77

Таблица 2*б* Результаты нахождения пьезомодуля для элемента в форме диска

Δf: 41500 Гц – 42200 Гц				
Кол-во точек	β_{ij} x10^{-12}, м/н	Аналог GBW метода	$d_{ij(о.ч.)}$	Δd_{ij}
		d_{31}x10^{-12}, к/н	d_{31}x10^{-12}, к/н	
40	4,86	108,15	101,57	6,08 %
60	4,86	108,44	106,58	1,71 %

Из представленных результатов видно хорошее совпадение результатов определения параметров ПКЭ.

Список литературы

1. Земляков В.Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография / В.Л.Земляков. − Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5.)
2. Земляков В.Л., Ключников С.Н., Кулинич А.И. Определение пьезомодуля пьезокерамических материалов на образцах элементов в форме диска // Известия ЮФУ. Технические науки, 2009, № 2, с. 212–215.
3. http://www.labview.ru/forum/

ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКОВ ЗВУКА ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Шаблицкий А.Ю., Доля В.К.

НКТБ «Пьезоприбор» ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Проблема акустических измерений зачастую требует использования проведения экспериментов в условиях повышенных температур. Очевидно, что в таких случаях необходима априорная информация о величине чувствительности звукоприемника *M* (величине коэффициента преобразования) во всем рабочем диапазоне температур. Анализ известных методов и средств измерения *M* показывает, что известные подходы к решению этой задачи могут быть сведены к двум вариантам: измерения в условиях «малой камеры» ($L<<\lambda$, L – наибольший размер камеры связи, λ - длина волны в рабочей среде); измерения в свободном поле в отсутствии отражений.

Очевидно, что во втором случае условие отсутствия отражений приводит к необходимости построения специальных помещений довольно больших размеров, в которых довольно проблематично обеспечить требуемые акустические свойства в широком диапазоне температур. Этот недостаток можно устранить при реализации первого варианта, управляю температурой «малой камеры» в целом. Однако условие $L<<\lambda$ резко снижает частотную область реализуемости.

Кроме вышеописанных проблем, существует еще один фактор, вызывающий трудности при практическом решении задачи измерения *M* при разных температурах, в частности – это выбор конкретного метода измерения. Используемые в настоящее время методы измерения *M* делятся на две группы: относительные и абсолютные [1]. Относительные методы базируются на использовании образцовых мер (в нашем случае это либо звукоприемник, либо источник звука), длякоторых также необходима априорная достоверная информация о температурной зависимости их чувствительности. Как правило, такая информация отсутствует. Вторая группа методов, как правило, использует «методы взаимности», которые также не могут быть использованы, поскольку применяемый в расчетах *M* коэффициент – «параметр взаимности» [1], рассчитан только для ограниченного числа реализация метода.

В настоящей работе описаны теоретические основы и представлена информация о практической реализации способа измерения *M*, свободные от вышеперечисленных недостатков.

Рассмотрим блок-схему (рис. 1) узла, обеспечивающего акустическую связь излучатель-приемник, используемого для измерения *M* по предлагаемому способу. В качестве излучателя 1 и звукоприемника 2 предлагается использование пьезоэлектрические преобразователи, температурная зависимость параметров которого неизвестна. Размеры рабочей поверхности преобразователя, длина *l* и радиус*a* камеры, а также размеры звукоприемника произвольны по отношению к длине волны λ.

Рис. 1. Блок-схема узла, обеспечивающего акустическую связь излучатель-приемник, где 1 – акустический излучатель; 2- камера связи длинной *l* и радиусом *a*; 3 – звукоприемник, U_B – напряжение поданное на преобразователь в режиме излучения, U_{xx} – напряжение на выходе звукоприемника.

Известно [2], что ток I_∂, протекающий через динамическую ветвь эквивалентной схемы [2] пьезоэлектрического преобразователя, работающего в режиме излучения, связан с динамической колебательной скоростью υ_∂рабочей поверхности преобразователя соотношением:

$$|\upsilon_\partial| = \frac{I_\partial}{A} = \frac{U_B \cdot |Y_\partial|}{A}, \qquad (1)$$

гдеA – коэффициент электромеханической трансформации преобразователя, Y_∂ – проводимость динамической ветви эквивалентной схемы [2] пьезоэлектрического преобразователя.

Для установления связи между υ_∂ и акустическим давлением Pна поверхности звукоприемника необходимо решение волнового уравнения со следующими граничными условиями $\upsilon = \upsilon_\partial$на границе излучатель – камера (условно $X = 0$), $\upsilon = 0$ на всех остальных границах камеры (условно $X = l$, $r = a$).

Известно, что акустическое давление на звукоприемнике связано с объемной колебательной скоростью поверхности источника звука следующим соотношением:

$$P = \upsilon_{\hat{i}\acute{a}} \cdot Z_{\ddot{i}}, \qquad (2)$$

где Z_n – акустический импеданс, $\upsilon_{об}$ – объемная скорость колебания поверхности источника звука, при этом $\upsilon_{\hat{i}\acute{a}} = \upsilon_{\ddot{a}} \cdot S_{\acute{y}\hat{e}\hat{a}}$, где $S_{экв}$ – эквивалентная площадь поверхности излучающего преобразователя.

Согласно [3] решением волнового уравнения для акустической камеры является следующее выражение, определяющее акустический импеданс в акустической камере связи, представленной на рис. 1:

$$Z_{\ddot{i}} = \frac{\rho \cdot c^2}{\omega \cdot V}\beta, \qquad (3)$$

где ω – круговая частота, V – объем акустической камеры, ρ – плотность воздуха, c – скорость звука в воздухе,β - коэффициент, характеризующий отношение акустического давления на конце акустической камеры к давлению в начале камеры [3].

Опираясь на теоретические сведения для камеры акустической связи [3], а так же на известные соотношения для определения параметров пьезоэлектрических преобразователей [4, 5] было получено выражение, позволяющее найти уровень акустического давления на звукоприемнике (на рис. 1 звукоприемник - 3):

$$P = \frac{U_B \cdot |Yd| \cdot \rho \cdot c^2}{\omega \cdot V} \cdot \beta \cdot S \cdot \mu \sqrt{\frac{L_d}{m \cdot \eta}}, \qquad (4)$$

где S – полная площадь колебательной поверхности преобразователя, L_∂ – проводимость динамической ветви преобразователя, m – полная масса преобразователя, η - коэффициент, связывающий полную массу преобразователя с динамической массой [5], μ - коэффициент, связывающий среднюю площадь поверхности колебаний с полной площадью колебательной поверхности преобразователя [5].

Зная акустическое давление, которое формирует излучающий преобразователь, несложно определить чувствительность преобразователя (звукоприемника) в режиме приема. Для вычисления акустического давления на конкретной частоте, согласно выражению (4), необходимо выполнять расчеты по следующей методике: во-первых, рассчитать все константы, характеризующие акустическую камеру, входящие в (4), во-вторых, вычислить модуль проводимости динамической ветви эквивалентной схемы пьезопреобразователя на данной частоте, и, в-третьих, измерить напряжение поданное на преобразователь U_B.

Для реализации разработанной методики, а так же для ее проверки был построен акустический стенд, схема которого представлена на рис. 2. С помощью данного стенда были произведенные измерения, результаты которых обрабатывались с помощью специально разработанной программы в среде пакета математических программ MathCad. В результате проведения эксперимента были получены значения уровня акустического

давления на конце камеры акустической связи, т.е. в точке расположения звукоприемника. Это давление измерялось контрольным методом с помощью эталонного измерителя уровня звукового давления (применялся измеритель шума и вибрации ВШВ-003-М3). Результаты измерений представлены на рис. 3а. Сплошная кривая соответствует давлению, теоретически рассчитанному по описанной в данной статье методике. Пунктирная кривая соответствует частотной характеристике давления, измеренной с помощью измерителя шума и вибрации ВШВ-003-М3.

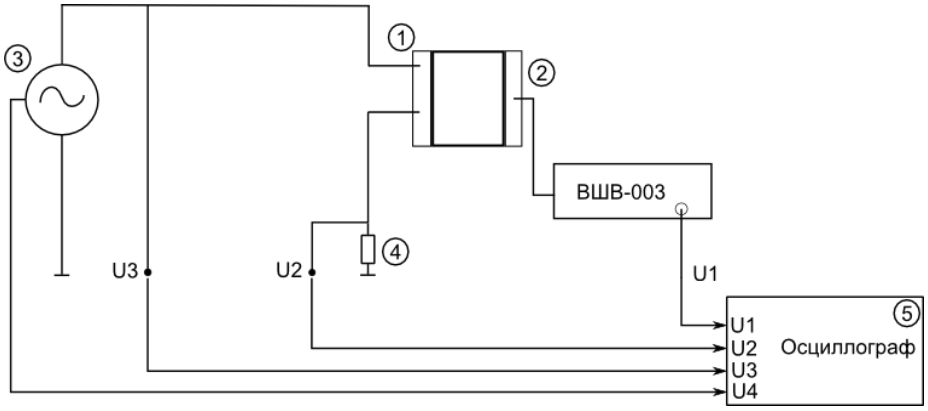
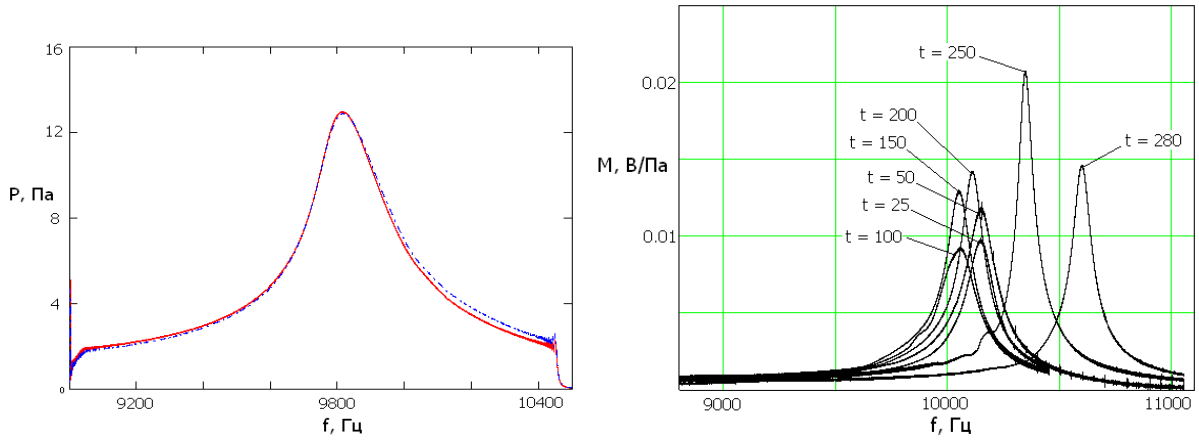


Рис. 2. Блок-схема экспериментального акустического стенда, где 1 – акустический излучатель, 2 – звукоприемник, 3 – генератор сигналов, 4 – датчик тока, построенный на резисторе и измерителе напряжения, 5 – измеритель напряжения, в качестве которого использовался цифровой осциллограф



а) б)

Рис.3. а) Графики частотной зависимости уровня акустического давления; б) АЧХ чувствительности пластинчатого пьезоэлектрического преобразователя при различных температурах (25 – 280 °С).

Анализ результатов измерений АЧХ давления, представленных на рис. 3а показывает, что с помощью разработанной методики и сконструированной камеры акустической связи появляется возможность с достаточной точностью измерять давление, формируемое излучающим преобразователем. Это позволяет определить чувствительность любого испытуемого преобразователя в режиме приема, установив его вместо эталонного звукоприемника. Основным достоинством разработанной методики является то, что параметры акустической камеры, используемой при измерении, не зависят от температуры, а малые габаритные размеры камеры позволяют применять ее в различных

высокотемпературных печах для определения чувствительности приемников звука при высоких температурах. На рис. 3б представлены графики зависимости чувствительности пластинчатого пьезоэлектрического преобразователя при различных температурах, полученные с помощью разработанной методики.

Список литературы

1. Боббер Р. Гидроакустические измерения. Мир. М. – 1974.
2. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Судостроение. Л. – 1990.
3. Хаясака Т. Электроакустика. М.: Мир, 1982. С. 168-189.
4. Земляков В.Л. Измерительные технологии в пьезоэлектрическом приборостроении: Учеб.пособие. – Ростов-на-Дону, 2010.
5. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Энергоатомиздат. Л. – 1990.

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМИ ПРОЕКТАМИ

МЕТОД КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ УДАЛЁННОМ ДОСТУПЕ К НАУКОЕМКОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Д.С. Савченко, А.В. Горчакова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Дистанционное образование должно предлагать различные виды учебной деятельности, включая реальные и виртуальные лабораторные практикумы. В случае виртуального практикума преподавателями готовятся интерактивные мультимедийные модели, имитирующие реальные установки. Если практикум реальный, то предполагается, что используется обычный лабораторный стенд, которым обучаемый может управлять со своего компьютера. Имеются исследования, которые утверждают, что для несложных процессов и закономерностей педагогическая эффективность двух типов экспериментов приблизительно одинакова. Однако с организационной точки зрения проведение реальных экспериментов требует решения ряда специфических задач.

Аналогичные проблемы возникают, когда научный центр (например, центр коллективного пользования) предоставляет доступ через Интернет к своему наукоемкому оборудованию для проведения экспериментов сторонним организациям.

Под удаленным доступом к специальному оборудованию и сложным приборам рассматриваются следующие схемы организации экспериментов.

—Управление прибором или установкой с рабочего места удаленного абонента. В этом варианте предварительно осуществляется пересылка образцов для проведения экспериментов, которые оператор устанавливает в рабочей зоне.

— Наблюдение за процессом исследования с использованием видеоконференц-связи, при этом образец также предварительно передается в лабораторию вместе с заданием на эксперимент, а затем в назначенное время абонент наблюдает за процессом и может руководить действиями оператора.

— Наблюдение за процессом исследования "чужого" образца с целью изучения приемов работы.

Очевидно, что только первый вариант можно считать в полном смысле "удаленным доступом к оборудованию". Он возможен благодаря тому, что современное наукоемкое оборудование включает управляющие компьютеры, обеспечивающие программное управление установками. Если используется удалённый доступ к такому оборудованию, то остро становится вопрос аутентификации и непрерывной идентификации исследователя работающего с учебно-научным комплексом.

Существующие распространенные варианты организации доступа лишь частично удовлетворяют этим требованиям. Широко распространенная аутентификация (пароли, ключи) не отличается высокой надежностью. Например, при некоторых обстоятельствах компьютером авторизованного пользователя может несанкционированно воспользоваться посторонний человек. Системы биометрической аутентификации (распознавание отпечатков пальца, ладони, радужной оболочки, голоса) требуют специальных средств, а также существует риск подмены образца [1].

Аутентификация методом клавиатурного почерка выгодно отличается не требовательностью к аппаратным средствам (используется стандартная клавиатура), возможностью перманентного удаленного использования и прозрачностью для исследователя. Точность метода по ошибкам первого и второго рода соответствует современным требованиям и не превышает допустимых значений [2].

Сегодня существуют системы идентификации объекта, основанные на анализе динамики набора парольной фразы. Это накладывает определенные ограничения на использование метода: аутентификация проводится явно и нельзя производить идентификацию непрерывно. Однако если в качестве базового материала для пространства признаков использовать не парольную фразу, а большой набор часто используемых комбинаций символов, то можно избавиться от многих недостатков метода. Действительно, можно сформировать матрицу часто используемых комбинаций в зависимости от сферы применения. В частности в русском языке можно выделить часто употребляемые сочетания букв, предлоги и окончания, местоимения и т.д. При использовании двухкоординатной системы принятия решений (оценка по интервалам между нажатиями символов и времени удержания клавиш) вероятность возникновения ошибки находится в диапазоне 1-3% [3]. Если исходные данные имеют большую корреляцию, то качество распознавания «свой – чужой» заметно падает. В таком случае часть данных можно отсеять без потери функциональности, т.к. аутентификация идет непрерывно. Для этой цели перед операцией принятия решения используется ряд фильтров, которые отбраковывают сильно коррелированные выборки – минимальные и максимальные значения, прерывистые и неравномерные данные. Сама же матрица меняется с течением времени: после каждой N-й удачно пройденной аутентификации эталонная матрица корректируется собранными усредненными значениями. Таким образом, эталонная матрица постоянно обновляется и содержит актуальные коэффициенты, характеризующие параметры символьного набора оператором.

Кроме того, посредствам метода клавиатурного почерка можно наблюдать за психофизическим состоянием исследователя, что позволяет дополнительно контролировать доступ к приборам имеющим высокую степень опасности.

Таким образом, аутентификацию можно применять прозрачно для пользователя, перманентно или периодически. Так же использование данного метода позволяет выявлять несанкционированный доступ уже после процесса идентификации паролем или другим способом, защищает от подмены объекта и гарантирует аутентичность. Использование метода в паре с парольной или ключевой аутентификацией позволяет гибко настраивать систему безопасности, обеспечивая высокий уровень надежности доступа к учебно-научным комплексам.

Список литературы

1. КобиелусДжеймс.Информационнаябезопасность:идентификацияиаутентификация. — М.: Связь,1997. – 252с.
2. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания.— М.: Высшая школа, 1989.— 232 с.
3. Завгородний В.В., Мельников Ю.Н. Идентификация по клавиатурному почерку. — //Банковские технологии 1998 № 9 — с. 68.

ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С УДАЛЕННЫЙ ДОСТУПОМ К НАУКОЕМКИМ ПРИБОРАМ

Е.А. Колпаков

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Технологии, используемые для формирования информационных сетей, позволяют реализовывать новые виды информационных услуг. Современные наукоемкие приборы и устройства — это системы, управляемые компьютерами. В большинстве случаев программное обеспечение таких систем включает специальный интерфейс (API), позволяющий не только разрабатывать свои управляющие программы, но и обеспечивать удаленный доступ в приборам. Благодаря этому появляется возможность предоставления новой услуги — выполнения экспериментальных исследований в удаленном режиме.

Регламент проведения таких экспериментов определяется конкретным прибором или лабораторным стендом.

Помимо удаленного доступа, компьютерное управление экспериментом дает возможность реализации еще одного типа услуг. А именно, хранить результаты ранее проведенных экспериментов и предоставлять их заинтересованным пользователям с помощью специализированной поисковой системы. Т.е., непосредственно система хранения информации об экспериментах не является самоцелью, она должна рассматриваться в комплексе с подсистемами поиска и анализа информации. А на этапе проектирования решения об архитектуре и структуре системы хранения нужно принимать с учетом функциональных требований к поисковым и аналитическим инструментам.

Рассматриваются подходы к организации поисковых механизмов для лабораторных систем с удаленным доступом к оборудованию, использующим в качестве долговременного хранилища реляционные базы данных.

Основной единицей информации в работе лабораторной системы с удаленным доступом является пакет, описывающий исходные данные, управляющие команды и результаты, полученные в ходе эксперимента. Будем называть размерностью пакета количество параметров, по которым будет необходимо предоставлять возможности поиска и фильтрации. Очевидно, что размерность пакета может меняться при переходе в рамках лабораторной системы от одной установки к другой, а также при изменении режимов эксперимента. Изменение размерности в зависимости от значений параметров конкретной экспериментальной сессии представляется нерациональным за счет сложностей в реализации. Под разнообразием пакетов будем понимать количество структурно различных пакетов данных в рамках одной системы (например, принадлежащих разным установкам, входящим в единую систему).

В зависимости от размерности и разнообразия пакетов, можно предложить несколько классов решений, обеспечивающих соблюдение предъявляемых к поисковой системе функциональных требований, и предоставляющих различный уровень быстродействия, масштабируемости, скорости разработки и сложности поддержки технической реализации механизмов поиска.

Простейшим классом решений являются решения, параметры пакетов в которых хранятся в качестве столбцов таблиц. Достоинствами такого подхода является высокая скорость разработки и низкая сложность при малой размерности и разнообразии пакетов. Дополнительным плюсом является легкость использования таких структур совместно с пакетами объектно-реляционного преобразования (object-relationalmapping, ORM). Тем не менее, масштабируемость таких систем оставляет желать лучшего, и с ростом размерности и разнообразия пакетов сложность поддержки растет крайне быстро. К тому же, в рамках такого подхода крайне сложно реализовать адекватную обработку пакетов различной структуры.

Альтернативой такому подходу является применение так называемых “динамических полей” (далее ДП). Сутью данной архитектуры является вынесение всех параметров пакетов, кроме небольшого количества общеиспользуемых, в отдельную структуру таблиц. Такая структура обеспечивает переход от “горизонтального” масштабирования, в котором рост количества атрибутов достигается за счет роста размерности и изменения структуры таблиц, к “вертикальному”, в котором этот рост достигается лишь за счет добавления новых записей, но без изменения структуры. Обычно создается одна таблица содержащая описание ДП, одна таблица для хранения данных ДП и иерархия таблиц для связывания данных ДП с сущностями базы данных, которым они соответствуют (в простейшем случае – одна таблица).

Достоинства этого подхода полностью определяются “вертикальным” режима масштабирования.

– Рост размерности и разнообразия пакетов приводит только к увеличению количества записей в таблице описания ДП, а не к изменению схемы БД.

– Неприменимость данных определенного характера для некоторого пакета (т.е. отсутствие параметра) приводит лишь к отсутствию записей в таблице данных ДП, но не требует внесения null или фиктивных значений.

– Возможность включения новых сущностей в поисковый механизм без необходимости внесения изменений в структуру таблиц этих сущностей.

Недостатками такого подхода является его относительно более высокая сложность, а также плохая поддержка ORM. Тем не менее, при высокой размерности и разнообразии пакетов, скорость разработки выше, а сложность поддержки меньше в разы.

При выполнении веб-проекта лабораторной системы с удаленным доступом для исследования наноматериалов (nanoscience-edu.sfedu.ru) встал вопрос о применении одной из описанных выше методик. В рамках данной системы функционирует два прибора: электронно-ионный сканирующий микроскоп Nova NanoLab 600 и многофункциональный рентгеновский микрозонд ESCALAB 250. Согласно функциональным требованиям к проекту, размерность пакетов данных была относительно низкой, что позволило эффективно применить методику хранения данных в качестве атрибутов таблиц. В дальнейшем данное решение позволило существенно сократить время разработки за счет использования ORM пакета для работы с базой данных.

Подводя итоги, при разработке лабораторных систем с удаленным доступом к оборудованию одним из важных факторов, оказывающих влияние на архитектуру системы, является структура поисковой подсистемы. Решение о структуре системы поиска необходимо принимать в зависимости от количества входящих в систему установок, разнообразия поисковых атрибутов и планов по масштабированию системы. В случае большого количества различных установок и высокой сложности поисковых запросов рекомендуется к применению подход, основанный на динамическом добавлении атрибутов к сущностям базы данных.

ИНТЕРАКТИВНЫЕ МУЛЬТИМЕДИЙНЫЕ МОДЕЛИ НАУКОЕМКИХ ПРИБОРОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБУЧЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

В.Н.Михайличенко

Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону ,Россия

Последнее поколение наукоемких приборов оснащено программным управлением, одним из назначений которого является обеспечение пользователям интеллектуального интерфейса. Однако эффективная работа с такими приборами все равно требует от пользователей высокого уровня знаний и навыков. Поэтому обучение работе со сложной и дорогостоящей техникой является одной из задач для вузовского учебного процесса, для систем повышения квалификации и для подготовки специалистов, которым необходимо использовать наукоемкое оборудование в отдельном проекте.

Создание приближенных к реальности интерактивных мультимедийных графических моделей (симуляций) приборов и процессов стало возможным только в последние десять-пятнадцать лет. Здесь, несмотря на наличие таких конкурентов, как MSSilverlight и HTML 5, преобладающее положение на рынке инструментов для моделирования по-прежнему удерживает технология AdobeFlash. На первых этапах ее возможности ограничивались анимациям с незамысловатыми сюжетами и минимальными средствами для обеспечения интерактивности. Соответственно, использование моделей в учебном процессе имело небольшой педагогический эффект. Однако сейчас AdobeFlash полноценный инструмент, позволяющий применять сложные сценарии работы модели с большим числом вариантов взаимодействий с пользователем. Усложнение моделей приводит к необходимости решать проблемы структурирования кода и модульного построения программ. Здесь нет единого решения, и необходима оценка разных подходов.

Для научно-образовательного комплекса исследования свойств наноматериалов с удаленным доступом к наукоемкому оборудованию (http://nanoscience-edu.sfedu.ru) были

разработаны два типа многофункциональных интерактивных моделей. Один тип предназначался для изучения принципов работы и использования электронно-ионного сканирующего микроскопа NovaNanolab 600, а второй — для рентгеновского микрозонда Escalab 250.

Многофункциональность моделей подразумевает, что создаваемые симуляции должны обеспечивать не только демонстрационные функции, но и предлагать сложную интерактивность, необходимую, например, для целей виртуальных лабораторных практикумов. Поэтому сценарии работы, которые были положены в основу моделей, имели разветвленную структуру, включающую использование большого числа программных объектов. Часть этих объектов играет роль универсальных контейнеров для других объектов, которые могут сложным образом взаимодействать друг с другом, когда пользователь управляет всей структурой с помощью меню.

Созданные интерактивные модели имеют несколько режимов работы. С их помощью можно изучать простые манипуляции, связанные с подготовкой приборов к выполнению экспериментов, внутреннее устройство приборов, физические основы процессов, протекающих в приборах, методов подготовки и установки образцов, а также выполнением виртуальных экспериментоы.

Симуляция прибора микрозонда ESCALAB 250 и связанные с ним виртуальные эксперименты потребовали создания пяти модулей. Эти модули предназначены для изучения устройства прибора, порядка его включения, методов подготовки и установки образцов, выполнения сканирования образцов и анализа обзорных спектров. Программно модули реализованы как интерактивные многокомпонентные анимированные символы типа MovieClip. Меню обеспечивает необходимую последовательность переключения модулей и переход на кадр, содержащий модуль. В период загрузки симуляции выполняется полная загрузка всех модулей. Это вызывает некоторую задержку выполнения, но зато обеспечивает быстрое переключение между модулями.

Симуляция для электронно-ионного сканирующего микроскопа NovaNanolab 600 и виртуальные эксперименты, связанные с ним, были реализованы с использованием другой схемы. Для каждого модуля был создан отдельный swf-файл. Меню основного модуля позволяет загружать разные модули фрагментов приложения, которые являются внешними для основного модуля файлами. При такой структуре симуляции происходит быстрая загрузка основного модуля, но переключение между остальными модулями происходит медленнее, чем в случае модулей–символов. Однако реализация модулей в виде отдельных swf-файлов позволяет использовать каждый из них самостоятельно, легко переносить из одного приложения в другое. Если модули имеют сложную структуру и функциональность, предпочтительнее реализовывать их в виде самостоятельного файла, подгружаемого при необходимости. Изменения отдельного модуля требует редактирования и перекомпиляция только одного сравнительно небольшого fla-файла.

Нужно отметить, что имеются исследования компьютерных обучающих систем, результаты которых показывают, что в учебном процессе виртуальные эксперименты с интерактивными мультимедийными моделями имеют большую педагогическую эффективность, чем реальные эксперименты, выполненные в удаленном режиме.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СПЕЦИАЛИСТА

А.Е. Зверяко

Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону

Важнейшим показателем потенциала организации является персонал, поэтому формирование компетенций для специалистов VI технологического уклада, способных решать задачи в области информационных технологий, трансформирующих

традиционную экономику, жилищную инфраструктуру, транспорт, медицину и образование - актуально в стратегии развития высших учебных заведений России. Акцент ставится на разработку ключевых компетенций в области принятия решений в учебных планах направлений подготовки, в соответствии с ФГОС. Контроль уровня освоения компетенций выполняется по традиционной схеме и является частью системы менеджмента качества учебного процесса Вузов:

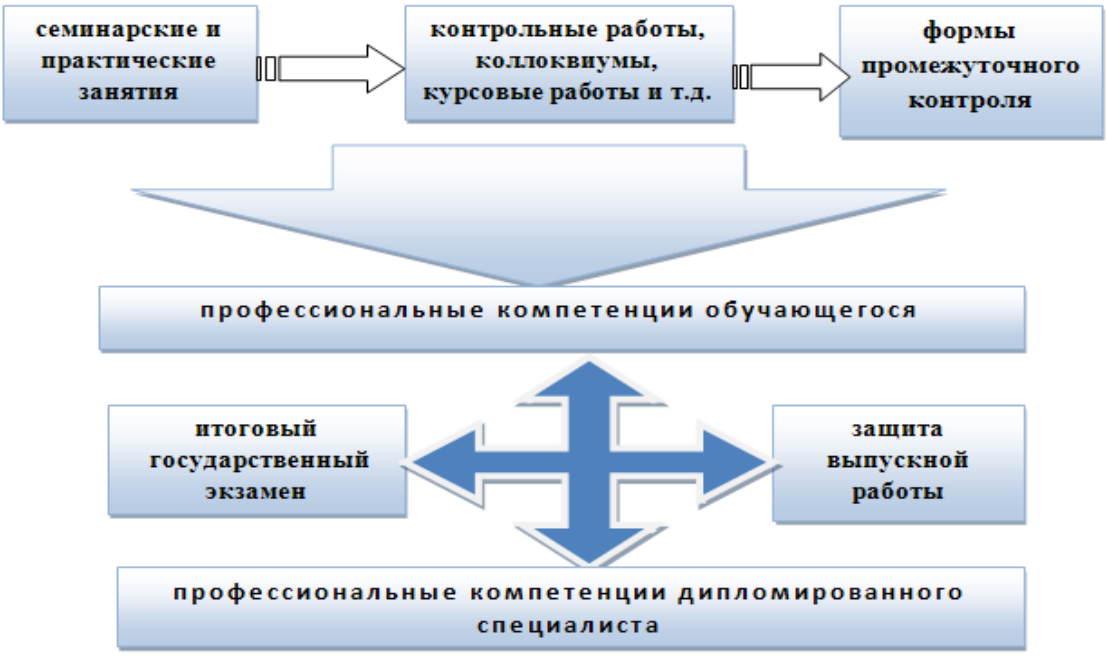


Рис.1 Контроль освоения компетенций в ВУЗах России

На представленной схеме модель контроля освоения компетенций как одной, так и комплекса дисциплин студентами высших учебных заведений России. Между элементами схемы существуют взаимосвязи, но отсутствует главная обратная связь, а также возврат к предыдущим уровням для элементов 1, 2, 4, таким образом, нет возможности возврата в определенный момент времени t_τ к недостаточно освоенной компетенции. Следовательно, существует отклонение на неизвестную величину от заданного для объекта управления (ОУ) **компетенции.**

Предположим, что процесс формирования **компетенции** является неуправляемым. В рассматриваемую систему введем дополнительный элемент, расширяющий ее функции и назовем его виртуальной адаптивной средой VGA.

Постановка задачи:

Для того чтобы процесса формирования компетенций был управляемым необходимо определить принцип управления (обратной связи) и найти множество исходных компетенций для VGA.

Пусть процесс формирования компетенций описывается векторным дифференциальным уравнением

$\dot{x} = f(x(t), v(t), t)$, (1), определенным в области $\boldsymbol{L}(x(t),V(t))\geq 0$ пространства вектора состояния

$x(x_1, x_2, \ldots x_n)$ и вектора управлений (множества учебных программ)

$\boldsymbol{v}(v_1, v_2, \ldots v_m)$, $t \in [t_0, T]$.

Задан класс допустимых управлений (исходных учебных программ)$\boldsymbol{V}$длявектора$\boldsymbol{v}(v_1, v_2, \ldots v_m)$, принимающего значения в области $\boldsymbol{L}\geq 0$, а также задан векторный функционал (вектор профессиональных компетенций УП)

$\boldsymbol{I}(v) = F(x(t), v(t), t)$ (2) с компонентами

$I_i(v) = F_i(x(t), v(t), t)$ $(i = 1, \ldots, n)$ (3)

Для вектора $\boldsymbol{x(t)}$ заданы граничные условия

$x(t_0) = x_0, \qquad x(T) = x_T,$ (4), где число T не является фиксированным.

Для компонент векторного функционала (2), (3) определены ограничения:

$/I_i(v)-I_{i0}/\leq M_i \quad (i = 1,\ldots,n),$ (5)

где $M_i \geq 0$ – заданные числа, а I_{i0} – оптимальные значения скалярных функционалов (3), определенные с помощью известных методов.

Предположим, что участок поверхности, образованный концами неулучшаемых векторов, найден. Назовем его неулучшаемой поверхностью. Пусть K – множество точек этой поверхности (множество Парето).

Предположим, что динамическая система учебного процесса управляема в области допустимых компромиссов, если существуют такие управления $\boldsymbol{v^*(t) \in V}$, что

$\boldsymbol{I}(v^*)=(I_1(v^*),\ldots, I_n(v^*)) \in \boldsymbol{X}$, (6) где $\boldsymbol{X} = \{(I_1, \ldots, I_n): /I_i - I_{i0}/ \leq M_i, \ (i = 1,\ldots,n)\}$.

Для того чтобы выполнялось (6), необходимо и достаточно, чтобы

$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{K} \cap \boldsymbol{X} \neq \varnothing$. (7)

Множество $\boldsymbol{V_0}^* \subset \boldsymbol{V}^*$ назовем областью оптимальных компетенций для работы с объектами VI технологического уклада, если каждый элемент $v_0^* \in \boldsymbol{V_0}^*$ оптимизирует векторный функционал (2) $\boldsymbol{I}(v_0^*) \in \boldsymbol{Y}$.

Таким образом, требуется определить множество $\boldsymbol{V_0}^*$ управленческих компетенций,

или $\boldsymbol{V_0}^* = \{\tilde{v}\ (t, I_{iT}) : I_i(\tilde{v}\ ) - I_{i0} \leq M_i. \quad I_{iT} \in [I_{i0} - M_i, I_{i0}]\}$. (8)

Нахождение (8) предполагает выбор эффективной учебной программы для подготовки специалистов формации VI технологического уклада и исходным множеством компетенций для внедряемой в учебный процесс адаптивной среды VGA.

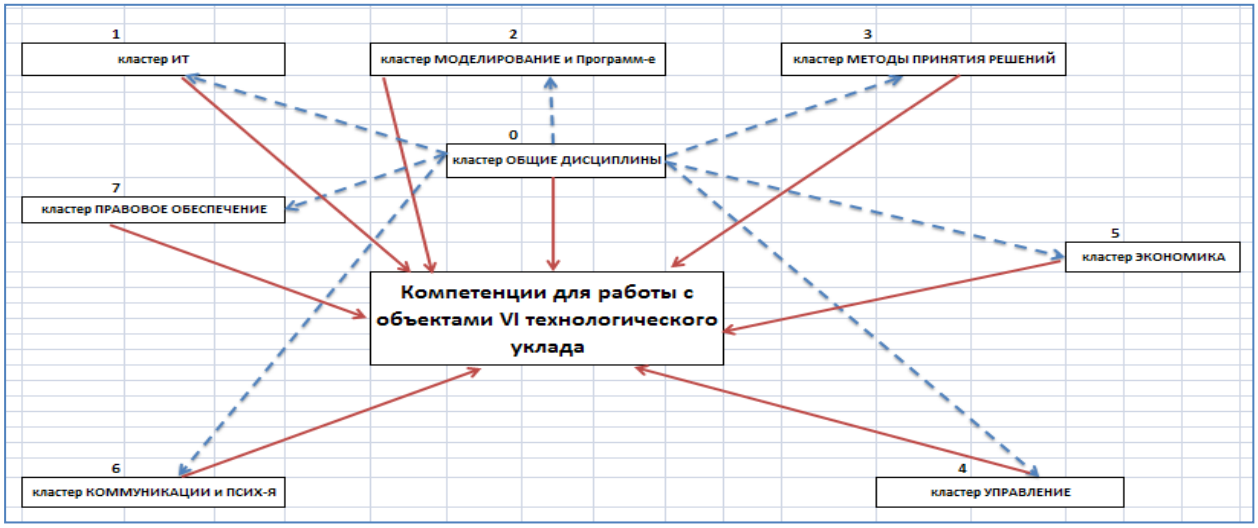


Рис.2 Модель формирования компетенций через кластеры

Помимо компетенций для VGA необходимо включить функции в соответствии с регламентом должностных обязанностей, синтезированные преимущественно из запросов работодателей , а также метрики качества производительности для оценки прохождения игры (рис.3).

Рис. 3 – Модель компетентности

При этом метрика производительности должна быть релевантной деятельности сотрудника (игрока VGA), то есть при разработке метрик для модели компетентности той или иной позиции необходимо составить функциональный профиль позиции игрока (роли)[i].

Таким образом, решение дифференциального уравнения и нахождение оптимальных траекторий множества Парето будет являться основой для разработки компетенций в области принятия решений. Следующей задачей является нахождение универсального алгоритма VGA, позволяющего обновлять множество исходных компетенций в соответствии с приоритетными направлениями науки в сфере высоких технологий.

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМ ПЛОХО СТРУКТУРИРОВАННЫМ ПРОЕКТОМ

А. С. Сомов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Идея работы заключается в представлении управления плохо структурированным проектом, как системы проектирования высокотехнологичного объекта и его ресурса в виде профессиональных компетенций. С этой целью проведена классификация проектов по индикаторам и исследованы ресурсы управления ими, в том числе:

1. Хорошо структурированный проект $\Omega = \{D, x_0, V(x), f(x,v), s(x,v), Кзд, Тзд, C\}$. Здесь D – множество этапов выполнения проекта; x_0 – первый этап; $x_0 \in D$, $V(x)$ – конечное множество набора действий в реализации отдельных этапов x; $f(x, v)$ – функция переходов. Из предыдущего этапа проект переходит в последующий под воздействием определенного набора действий $\boldsymbol{v}$(технологии, инструмент, пакеты прикладных программ или выбором человеческого ресурса (количество) в состоянии$f(x,v)$), $x \in D$, $v \in V(x)$, $f(x, v) \in D$; $\boldsymbol{s}(x,v)$ – функция платежа. При этом $v \in V$ определяется из условий $T(x,v) \leq Тзд$, $s(x,v) \in C$, $K(x,v) \in Кзд$, где $Тзд$, C, $K(x,v)$ -заданные время, стоимость и содержание проекта.

2. Неструктурированный или плохо структурированный проект

$\Omega^{\bullet} = \{D; x_0; F; V(x), f(x,v), s(x,v)\}$. Здесь D – множество состояний проекта; x_0 – начальное состояние; F – множество конечных состояний, $x_0 \in D$, $x_0 \notin F$, $F \subset D$; $V(x)$ – конечное множество возможных в состоянии x ресурсов (управления), $x \in D \backslash F$; $f(x, v)$ – функция переходов (из

состояния x под воздействием управления v проект переходит в состояние $f(x,v))$, $x \in D \backslash F$, $v \in V(x)$, $f(x, v) \in D$; $s(x,v)$ – функция платежа.

Конечную последовательность $T = \{x^0, x^1, x^2, \ldots, x^n\}$ состояний проекта Ω представляет траектория проекта, если выполняются условия:

$x^t = f(x^{t-1}, v^t)$, где $v^t \in V(x^{t-1})$, $t = 1, 2, \ldots, n$.

Проведенный анализ работ, затрагивающих вопросы постановки и решения указанных задач, показал следующее: разработаны и широко применяются при управлении проектами большое количество методов [1]: метод критического пути CPM (Critical Path Method), PERT(Program Evaluation Review Technique), гибкая методология разработки (agilesoftwaredevelopment), AgileModeling, AgileUnifiedProcess, AgileDataMethod RapidApplication Development, RADFeatureDrivenDevelopment, GettingRealOpenUnifiedProcess, логико-структурный подход, метод PRINCE (ProjectsinControlledEnvironments) и др. Все эти методы сориентированы на хорошо структурированные проекты, и применение их к управлению высокотехнологичными (плохо структурированными) проектами вызывает определенные трудности и неоднозначности получаемых алгоритмов и программ. И уж совсем они не применимы для высокотехнологичных проектов и программ, проектирование которых и управление ими направлено на получение эффективных (неулучшаемых) характеристик социотехнической системы в целом с заранее неопределенным множеством конечных состояний проекта.

Постановка задачи. Для проекта $\Omega^{\bullet}$ найти полную траекторию выполнения работ T минимальной стоимости. При этом, скорее всего, окажется, что выбранная таким образом траектория проекта не будет оптимальной по времени его исполнения. Задача может быть сформулирована иначе. Найти полную траекторию проекта с минимальным временем его исполнения. Однако стоимость такого проекта окажется отличной от оптимальной. Выбор эффективного решения обычно не является однозначным и определяется компромиссом между ценой и временем, т.е., в зависимости от критерия выбора решения по составу проекта, алгоритмы управления им могут быть различными. Качество, или содержание проекта в любом из рассматриваемых случаев определяется едиными требованиями. При таком подходе нарушается обычно принятая при управлении проектом его структуризация, т.к. содержание проекта может изменяться, а, значит, перестают работать известные методы управления и основным ресурсом его выполнения становятся состав исполнителей и их профессиональные компетенции. Таким образом, рассматриваемая задача приобретает многокритериальность и оптимизация управления проектом предусматривает разработку моделей, алгоритмов и программ, позволяющим сформировать конечное множество возможных решений.

Для нахождения траекторий проекта $\mathbf{\Omega}^{\bullet}$ с минимальным временем исполнения всех назначенных операций $T = \{x^0, x^1, x^2, \ldots, x^n\}$, $x^t = f(x^{t-1}, v^t)$, где $v^t \in V(x^{t-1})$, $t = 1, 2, \ldots, n$. может быть использован метод критического пути [1].

Пусть дискретно управляемый проект $\Omega^{\bullet}$, представлен ***n*** работами и определяется конечным взвешенным ориентированным графом $G(\Omega^{\bullet})$, вершины которого взаимно однозначно соответствуют состояниям проекта, дуги – управлениям, веса дуг – стоимостям соответствующих переходов. Такими проектами могут быть: альтернативные структуры тепло, газо, электро- снабжения, альтернативная энергетика, виды вооружения и т.д.

Начальным является состояние 0, множество финальных состояний F_i. Требуется найти полную траекторию минимальной стоимости.

Задача решается с использованием динамического программирования Беллмана. Для состояний проекта $\Omega^{\bullet}$ вычисляются значения функции Беллмана и находится минимальная стоимость полной траектории.

Для этого же проекта $\mathbf{\Omega}^{\bullet}$ с произвольной траекторией стоимость определяется следующим образом: $C(T) = \sum_{i=1}^{n} s(x^{t-1}, v^t)$, т.е. стоимость траектории – есть сумма пошаговых платежей, имеющих место при реализации траектории T.

Полученная модель в виде графа определяет связь между временем выполнения работ и затратами. Для проекта находятся ресурсы (дуги), являющиеся индикаторами профессиональных

компетенций исполнителей, при которых достигаются минимальные затраты при определенной продолжительности и функциональной направленности проекта.

В докладе представлены модели, алгоритмы и программы принятия решений в управлении высокотехнологичным, плохо структурированным проектом газораспределения на объектах различного функционального назначения.

Список литературы

1. Рассел Д. Арчибальд Управление высокотехнологичными программами и проектами. Изд. третье, переработанное и дополненное. М., 2004.-431с.

ФОРСАЙТ-АНАЛИЗ КАДРОВОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Е. В. Корохова, Ю.С. Чусова, А.В. Петракова

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Под форсайт-анализом будем понимать комплексный анализ на основе методов экспертной оценки стратегических направлений социально-экономического и инновационного развития, а также выявление перечня технологий, способных оказать воздействие на экономику и общество в средне- и долгосрочной перспективе.

Одним из важнейших направлений применения форсайт-анализа являются нанотехнологии (НТ), входящие в перечень критических технологий Российской Федерации и определяющие как степень развития других приоритетных технологий, так и уровень технологического развития страны в целом. Форсайт-анализ позволяет дать комплексное взаимосвязанное представление о перспективах развития НТ, оценить возможность инновационного развития производства и соотнести с уже существующими и перспективными потребностями в продукции. Существенным фактором развития новых отраслей науки и технологий является обеспеченность квалифицированными кадрами, способными решать сложные научно-инновационные задачи. В работе поставлена и решена задача форсайт-анализа кадровой обеспеченности развития НТ. В качестве инструмента исследования использован системно-динамический подход к имитационному моделированию и среда AnyLogic, реализующая данный подход.

На первом этапе построена когнитивная карта научно-технологического окружения НТ, позволяющая исследовать взаимное влияние нанотехнологий, науки и других технологий. Эта модель представляет собой параметрический ориентированный функциональный граф

$$K<G, X, F, P>,$$

где K – кортеж, в котором G – знаковый ориентированный граф,

$$G = <E, R>,$$

в котором E – множество вершин графа (области науки и техники),

$$E= \{e_i | e_i \in E, i = \overline{1,k}\},$$

где k –количество областей науки и техники; R – множество связей влияния графа,

$$R = \{r_{i,j} | r_{i,j} \in R, j = \overline{1,k}\}$$

отражает взаимосвязь между вершинами, влияние может быть положительным, отрицательным или отсутствовать.

$X: V \to P$, где P – пространство параметров вершин, X – множество параметров вершин,

$$X = \{x^{(E_i)} | x^{(E_i)} \in X, i = \overline{1,k}\}; x^{(E_i)} = \{x_g^{(i)}\},$$

где g=$\overline{1,m}$. $x_g^{(i)}$ - параметр вершины E_i.

$F: R \times X \times P; F = F(X, R)$ – функционал преобразования дуг, ставящий в соответствие дуге либо знак («+» или «-»), либо весовой коэффициент w_j , либо функцию $f_{i,j} = f(x^{(E_i)}, x^{(E_j)}, r_{i,j})$. Зависимость $f_{i,j}$ может быть не только функциональной, но и стохастической [16].

Определение весовых коэффициентов для взаимосвязей между вершинами осуществлено на основе анализа экспертных данных и официальной статистики.

Выделены управляющие вершины (вершины, на которые лицо, принимающее решение имеет возможность непосредственно воздействовать) и целевые вершины, изменение или стабилизация которых является целью управления.

Далее определены функциональные требования к имитационной модели, представленные диаграммой вариантов использования универсального языка моделирования UML (рис. 1). Имитационная модель должна отражать взаимосвязь количества магистров и бакалавров, работающих в научных учреждениях и количества поступающих на специальности, связанные с нанотехнологиями, и учитывать демографическую динамику, привлекательность обучения на приоритетных специальностях и работы в научных учреждениях, обеспеченность образовательного и научно-инновационного процессов и др. Модель должна выявлять критические факторы достаточности научных кадров в области НТ и способы повышения уровня престижности профессий в области нанотехнологических разработок. Модель может быть использована руководством страны для оценки альтернативных сценариев развития НТ, а также Министерством образования и науки для разработки эффективной образовательной стратегии.

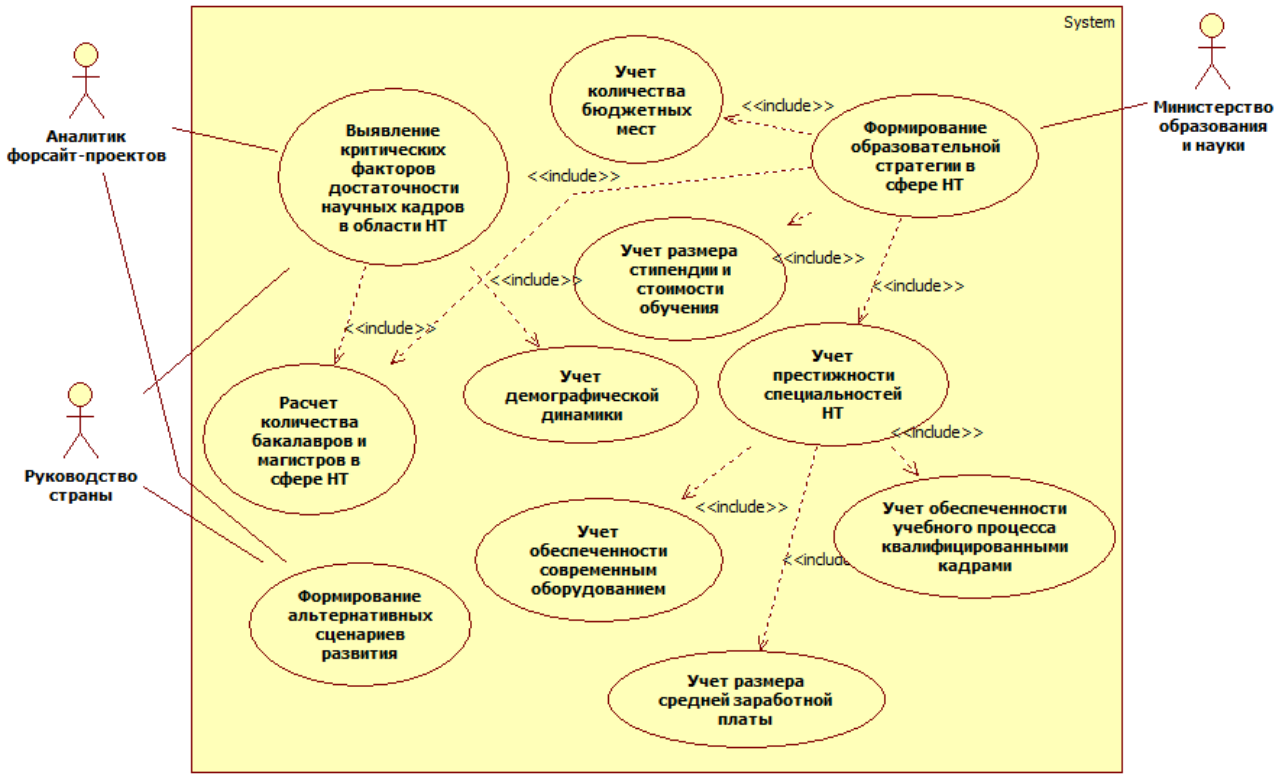


Рис. 1. Функциональные требования к имитационной модели

На следующем этапе для построения имитационной модели, отражающей динамику обеспеченности кадрами нанотехнологий (рис.2), проведен комплексный анализ с помощью мнений экспертов, статистических данных и опросов. Так, для анализа процесса выбора специальности и места обучения проведен опрос среди студентов ЮФУ. С помощью диаграммы Парето определены существенные факторы – стоимость обучения, престижность специальности и средний размер заработной платы по специальности. На основе данных официальной статистики определены параметры имитационной модели: население России возрастной категории от 17 до 25 лет, численность выпускников школ и

колледжей, конкурс на специальности «Нанотехнологии» и «Наноматериалы», численность бакалавров и магистров по этим специальностям и их трудоустройство в 2011 году.

Имитационная модель условно может быть представлена в виде трех последовательных процессов: поступление, обучение (бакалавриат, магистратура, аспирантура/докторантура).

Потенциальные абитуриенты принимают решение о поступлении на специальности в области НТ, учитывая престижность специальности, стоимость обучения, количества бюджетных мест и уровень подготовки, который, в свою очередь, определяется оснащенностью современным оборудованием и квалифицированными кадрами. Количество абитуриентов (рис. 3, а), поступающих на НТ, сначала растет, так как престиж, формируемый общественным интересом к этой области высокий. Далее интерес постепенно угасает и сдерживающими рост факторами становятся: стоимость обучения, количество бюджетных мест и недостаточный уровень обеспеченности учебного процесса. Так, например, в ЮФУ стоимость обучения по специальности «Нанотехнологии и микросистемная техника» составляет 112 000 рублей в год, при этом по специальности «Радиофизика» - 63 800 рублей в год. Если такое соотношение стоимости обучения по приоритетным направлениям и другим специальностям сохранится, то число потенциальных абитуриентов будет снижаться до некоторого значения, определяемого конкурсом, как это показано на рис. 3. В этом случае базовая подготовка абитуриентов не может быть высокой и, соответственно, сложнее сформировать у выпускников требуемые компетенции.

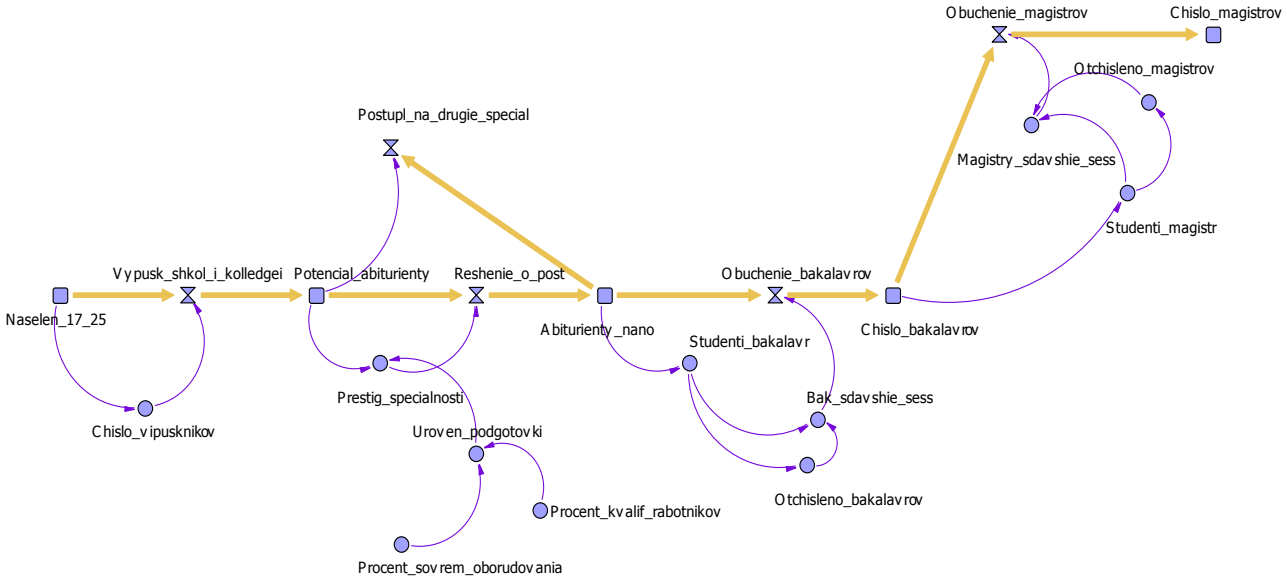
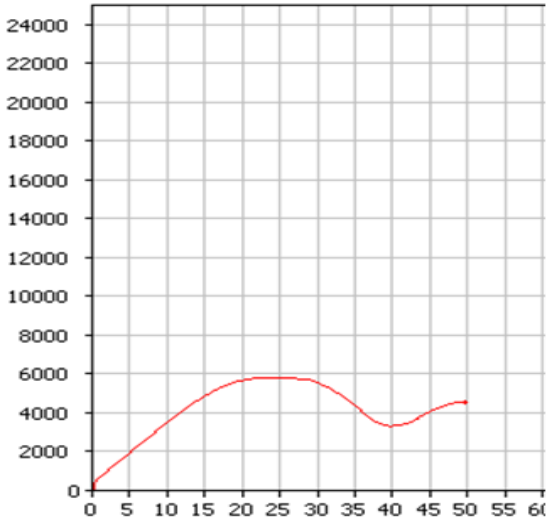
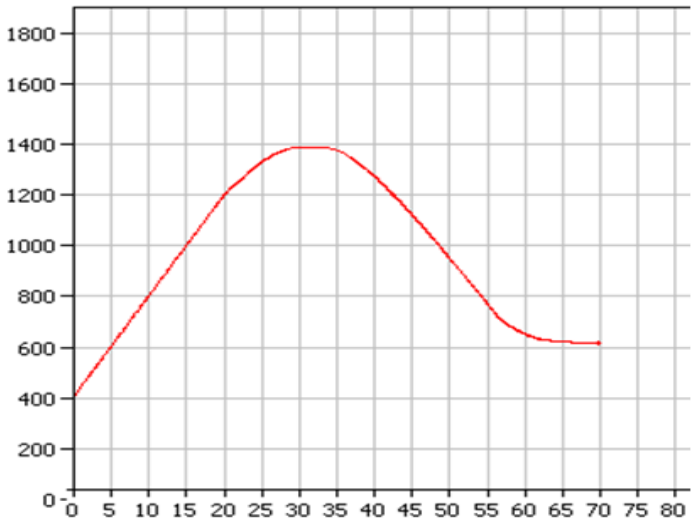


Рис. 2. Графическое представление структуры имитационной модели



а) динамика численности абитуриентов, поступающих на специальности в области нанотехнологий



б) динамика численности бакалавров и магистров в научных учреждениях

Рис.3. Результаты имитационного моделирования

Число бакалавров и магистров в научных учреждениях (рис. 3, б) зависит от следующих показателей: число мест на бюджетной и коммерческой основе, число предприятий, уровень финансирования, инвестиции, оплата труда.

Создание новых исследовательских центров, наукоградов, поддержка существующих научных центров, занимающихся нанотехнологиями, приводит к росту рабочих мест, которые занимают выпускники бакалавриата и магистратуры. Это отражается на росте этого показателя. Однако, как показывает опыт проведения национальных проектов, выделенные средства распределяются и используются нерационально. Не создается инфраструктура и среда, способная в дальнейшем самостоятельно реализовывать цели таких проектов. В сфере нанотехнологий можно наблюдать подобные процессы. Если ситуация не изменится и научные центры не будут проводить серьёзных исследований и заниматься трансфером и диффузией технологий, то после завершения финансирования из федерального бюджета, их число будет сокращаться, заработные платы сотрудников снижаться, соответственно большее число работников будет уходить в другие сферы, как это показано на рис. 3.

Таким образом, в результате форсайт-анализа на основе имитационного моделирования установлено наличие факторов, негативно влияющих на систему, а также выявлены «критические» факторы, путем воздействия на которые можно повлиять на подготовку высококвалифицированных специалистов в области нанотехнологий, востребованных на рынке труда.

МОДЕЛЬ ВЫТЯГИВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ НАУКОЕМКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Е.В. Корохова, В.В. Корохов, Е.Н. Бородулина

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Наукоемкие предприятия зачастую сталкиваются с комплексом проблем, возникающих на всех этапах жизненного цикла изделия. Объектом исследования является организационная структура, состоящая из научно-исследовательского опытно-конструкторского комплекса по созданию и производству химических источников тока и

предприятия – производителя компонентов, взаимодействующего с ним. Цель работы заключается в повышении эффективности деятельности представленной структуры путем разработки компонента материально-технического снабжения для системы информационной поддержки жизненного цикла химических источников тока.

Процесс материально-технического обеспечения научно-исследовательской и производственной деятельности является особенно важным, поскольку он находится в начале жизненного цикла и возникающие здесь сложности, связанные с неэффективным принятием решений, приводят к серьезным последствиям на других стадиях:

- организационным (сбои и простои в производстве, невыполнение или выполнение с опозданием заказов и др.). Часто эти проблемы связаны с управлением производством по «выталкивающему типу», которое осуществляется независимо от фактического темпа выполнения последующих процессов;

- материальным (административные расходы на разрешение рисковой ситуации и изменение производственных графиков; оплата простоев основным производственным работникам или изменение тарифов оплаты труда в периоды «авралов»; затраты, связанные с запасами - хранение избыточного количества сырья и комплектующих, задержка доставки при дефиците сырья и др.).

Источники таких проблем могут быть внутренними, образующимися на предприятии – изготовителе, и внешними, относящимися к контрагентам. Определены следующие факторы, порождающие или и осложняющие организацию снабжения:

- нелинейный характер потребностей в сырье и комплектующих, который обосновывается стохастичностью поступления заказов и зависимостью от сроков проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, являющихся особенностью наукоемких предприятий;

- зависимость поставок от ограничений производственных мощностей поставщика.

Исходя из этого, устранение выявленных недостатков может быть осуществлено путем внедрения в управление материальными потоками следующих нововведений:

- концепции «точно в срок», ориентированной на спрос, который является основой для корректировки плана снабжения;

- вытягивающей системы управления производством, в котором объем партии ограничен.

В результате схема управления материально-техническим снабжением, обеспечивающая полное и своевременное удовлетворение спроса на продукцию, с учетом существующих ограничений на поставку при условии, что материальные затраты минимальны, будет иметь вид, представленный на рис. 1.

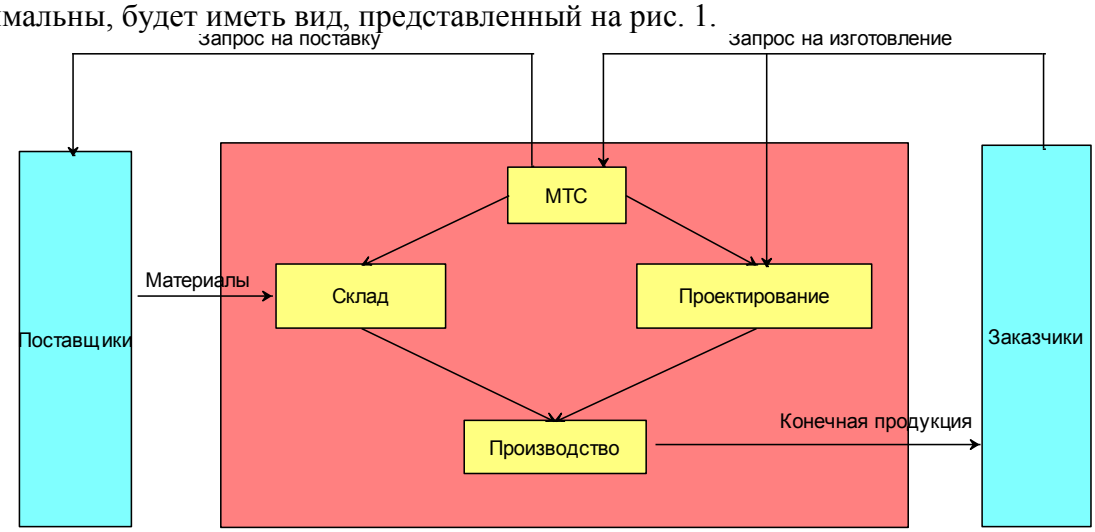


Рис. 1. Вытягивающая система управления производством в соответствие с концепцией «точно в срок»

Задача принимает вид управления многономенклатурными запасами и имеет следующий математический смысл: необходимо составить план поступления m видов материалов, который обеспечивал бы полное и своевременное удовлетворение потребности предприятия в данном виде элемента - D_m единиц в месяц, с учетом того, что расход ресурса происходит неравномерно и поступление ограничено производственными мощностями поставщика. Интервал между поставками m материалами один месяц.Дефицит, вероятность которого возникает в моменты высокого спроса, невозможен. Объем одной партии m товара q_m единиц содержит K_m элементов, не проходящих проверку комплектности. Данная величина характеризуется статистически определяемым параметром - уровнем утилизируемых ресурсов k, $K_m = k^* q_m$. Кроме того, при хранении ресурса на складе производственные характеристики материалов могут ухудшаться и статистическая обработка данных, при вторичном контроле параметров через три месяца показывает, что средний объем брака достигает $B_m = b^*q_m$. Закупочная цена не зависит от размера заказа.

Таким образом, требуется определить параметры стратегии управления запасами: оптимальный размер заказа q_m материала, срок соответствующей поставки.

При полученных значениях должны быть минимальны затраты:

- C_{1m} — затраты на доставку и хранение единицы товара;

- C_{2m}— средние ожидаемые потери из-за наличия бракованных материалов, зависят от объема партии химических элементов.

- C_{3m}— средние ожидаемые потери из-за хранения ресурсов на складе и ухудшения производственных характеристик, зависят от объема партии и времени нахождения на складе.

В таком случае риски невыполнения заказа или выполнения не в срок, а так же связанные с ними потери сокращаются и могут быть обусловлены только внешними неконтролируемыми факторами. Спрос на m вид ресурса, регистрируемый при оформлении заказа, неравномерен и изменяется, как показано на рис. 2.

Величина D_m является дискретной случайной и может принимать значения большие, чем установленный уровень, что является недопустимым при используемой модели управления запасами. Это объясняется тем, что высокий спрос не всегда может быть удовлетворен единичным заказом, в виду ограниченности производственных мощностей.

Поскольку в наукоемких предприятиях наиболее долгосрочным этапом является научно – исследовательских и опытно-конструкторских работ, а сам процесс производства занимает относительно незначительный промежуток времени, то планирование целесообразно проводить от конечной даты выполнения заказа и находить соответствующие параметры управления запасами.

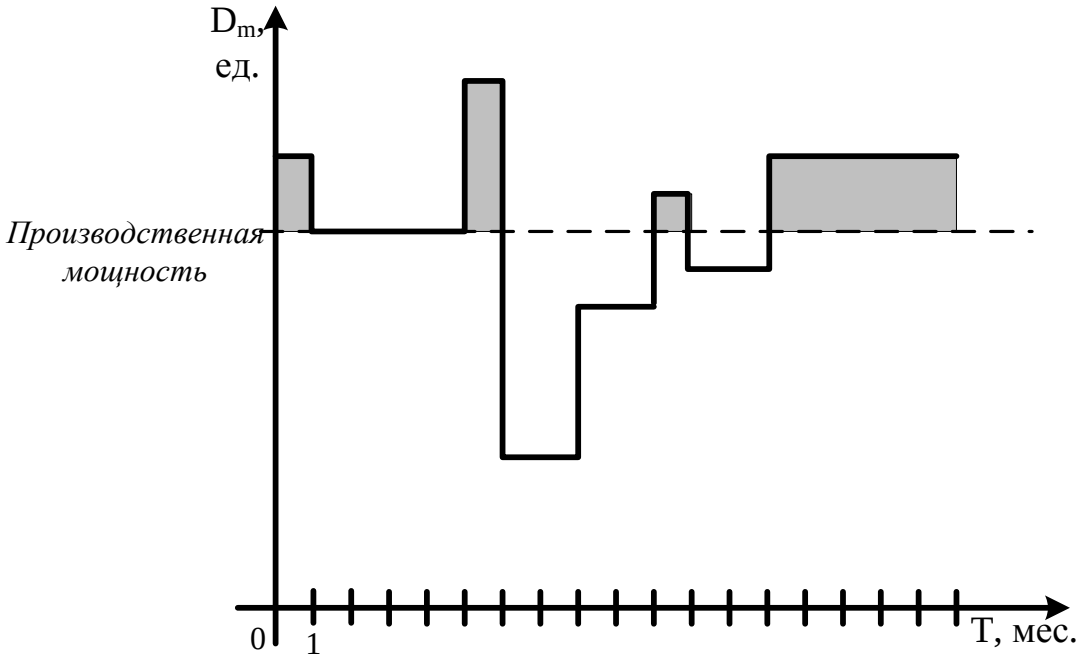


Рис. 2. График удовлетворения спроса при выталкивающей системе управления запасами (цветом выделен неудовлетворенный спрос)

Объем месячной партии m вида товара с учетом неиспользуемых элементов $q_{mi\ пол.} = q_{mi\ зак.} - k * q_{mi\ зак} - b * q_{mi\ зак}$, Тогда объем партии в i месяце $q_{mi\ пол.} = q_{mi\ зак}\ (1 - k - b * n)$.Функция суммарных затрат за промежуток времени T имеет следующий вид

$$C = \sum_{T=1}^{n} C_{1m} * q_{mi\ зак.} + C_{2m} * k * q_{mi\ зак} + C_{3m} * b * q_{mi\ зак},$$

Минимальное значение данного показателя будет достигнуто при минимальном значении $dC(q_{mi})/dq_{mi}$, то есть $C_{1m} + C_{2m} * k + C_{3m} * b \rightarrow \min$. Технологические параметры являются постоянными величинами, поэтому снижение затрат возможно только за счет уменьшения времени хранения запасов на складе, а соответственно срока поставки первой партии комплектующих относительно конечной даты производства готового изделия.

В результате поставки больших размеров должны приходиться на конечные сроки. Таким образом,$q_{mi\ зак}$ определяется производственными возможностями поставщика, $q_{mi\ пол.} = q_{mi\ зак.} * (1 - k - b)$, промежуток времени рассчитывается так, чтобы к конечной дате был удовлетворен спрос.

Таким образом, предложенная модель управления запасами является более эффективной, поскольку не допускает неудовлетворенного спроса и при этом учитывает ограничения производственных мощностей, возможные потери, связанные с браком и хранением на складе. Полученные результаты могут быть использованы для создания единой информационной среды информационной поддержки жизненного цикла продукции,обеспечивающей решение основных задач управления наукоемким производством.

МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И АЛГОРИТМЫ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ ОТ ГРАДА НА ОСНОВЕ ТРИЗ

Е.В. Корохова, И.С. Шабаршина, А.В. Дурановская, К.В. Тухикян

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Ростовская область

По данным Всемирной метеорологической организации градобития ежегодно наносят мировому сельскохозяйственному производству ущерб, исчисляемый многими миллиардами долларов США. В связи с этим десятки стран осуществляют научные и оперативные проекты подавления града. Задачей является обеспечение защиты территории от вредного воздействия града. В Российской Федерации и в ряде зарубежных стран успешно применяется ракетный метод активного воздействия на градовые облака с целью предотвращения или прерывания града, разработанный в шестидесятые годы прошлого столетия и развиваемый в настоящее время. Такое решение дорогостоящее, поэтому на практике защищается только небольшая часть территории. Однако развитие техники и технологий позволяет решать многие известные и решаемые традиционными методами проблемы альтернативными более эффективными способами. Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) представляет собой набор методов, объединенных общей теорией. ТРИЗ помогает в организации мышления изобретателя при поиске идеи изобретения, и делает этот поиск более целенаправленным, продуктивным.

Анализ многих тысяч изобретений позволил выявить, что при всем многообразии технических противоречий большинство из них решается 40 основными приемами. Приемы можно разделить на несколько групп, исходя из того, какие средства преодоления противоречия они предлагают использовать:

- использование новых и перспективных материалов и эффектов. Здесь вниманию изобретателя предлагается комплекс средств решения задач, включающих использование гибких оболочек и пленок, пористых и композиционных материалов;
- изменение структуры технической системы или организации процесса. Множество предложений этой группы, таких, как принципы проскока, асимметрии, предварительного исполнения, посредника позволяют находить интересные и неожиданные варианты решений;
- операции над объектом, введение ограничений и новых возможностей. Можно назвать некоторые из них: дробление, изменение физико - химических параметров объекта, универсальность, динамичность, частичное или избыточное решение, самообслуживание.

Решением задачи может быть обеспечено одним из трех вариантов: не допустить появления вредного воздействия; компенсировать вредное воздействие в процессе; устранить результаты вредного воздействия. Самой экономичной является реализация первого варианта, поэтому выбрана именно эта формулировка поставленной задачи.

Противоречие состоит в следующем: если использовать больше установок, то повысится защищенность, надежность, но увеличится стоимость, если мало - территория будет незащищена. Определены подходящие приемы (принципы) для решения такой задачи: вынесения; местного качества; предварительного действия; проскока; однородности; изменение физико-химических параметров объекта.

Рассматриваемая система в общем виде состоит из следующих элементов (рис. 1).

Далее каждый из принципов применен к какому-либо элементу или свойству элемента.

Принцип предварительного действия. Заключается в том, чтобызаранее выполнить требуемое изменение объекта (полностью или хотя бы частично). Этот принцип предлагается применить к свойству облака «Площадь области образования града». В верхней части облака имеются отрицательные температуры, и частицы влаги, испаряясь, попадают в эту переохлажденную часть облака, замерзают, образуя тем самым град. Применяя данный

принцип к рассматриваемому свойству облака, задача формулируется следующим образом: необходимо воздействовать на переохлажденную часть облака до того, как испаряющиеся частицы влаги попали в эту область и замерзли. Для решения этой задачи необходимо либо нейтрализовать вредное воздействие (низкую температуру) в этой части, либо удалить переохлажденную часть. Нейтрализовать вредное воздействие можно, совершив некоторую работу для повышения температуры воздуха в этой части облака.

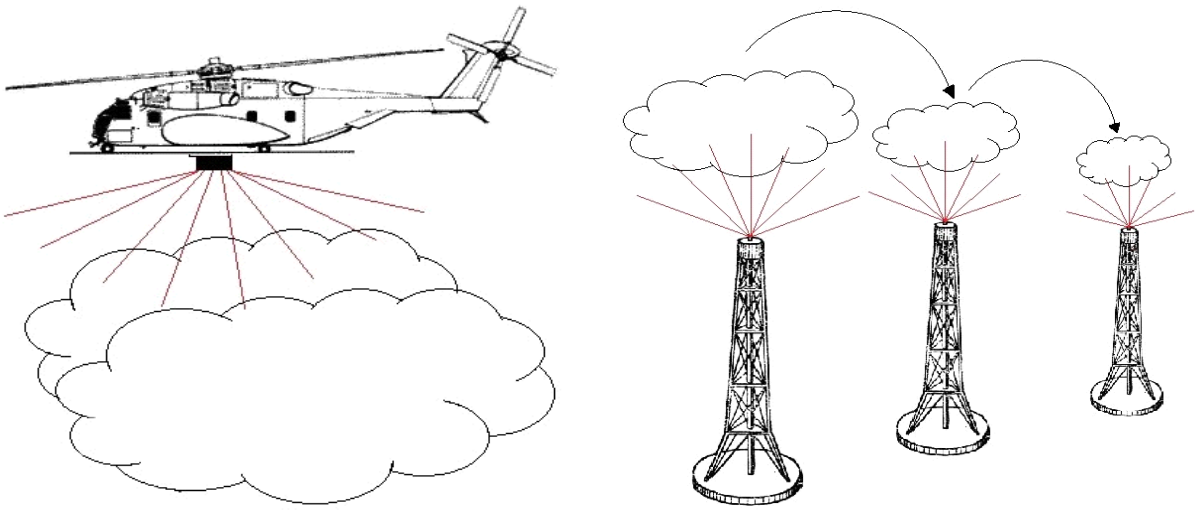
Облако	**• площадь области градообразования;** **• высота нижней границы (высота над уровнем моря);** **• скорость движения облака;** **• категория облака(уровень развития);** **• мощность (габариты);** **• высота облака;**
Реагент	**• концентрация;** **• состав;**
Град	**• размер градин,** **• концентрация в облаке,** **• скорость образования.**
Поле	**• площадь поля,** **• объем засаженных культур;**
Урожай	**• масштабы урожая (богатый или бедный урожай)** **• ценность урожая (насколько важные культуры выращиваются)** **• возможная степень нанесенного урона.**

Рис. 1. Элементы системы противоградового воздействия

1. Применение инфракрасного излучения.

1.1. С помощью летательного аппарата воздействовать на переохлажденную зону непосредственно над облаком, закрепив на основании данного летательного аппарата рассеивающий источник излучения (рис. 2 а).

1.2. По рассчитанной синоптическим отделом траектории прохождения града установить вышки, оснащенные инфракрасными датчиками, и, после поступления сигнала об опасности возникновения града, воздействовать с этих вышек на облако инфракрасным излучением (рис. 2 б).



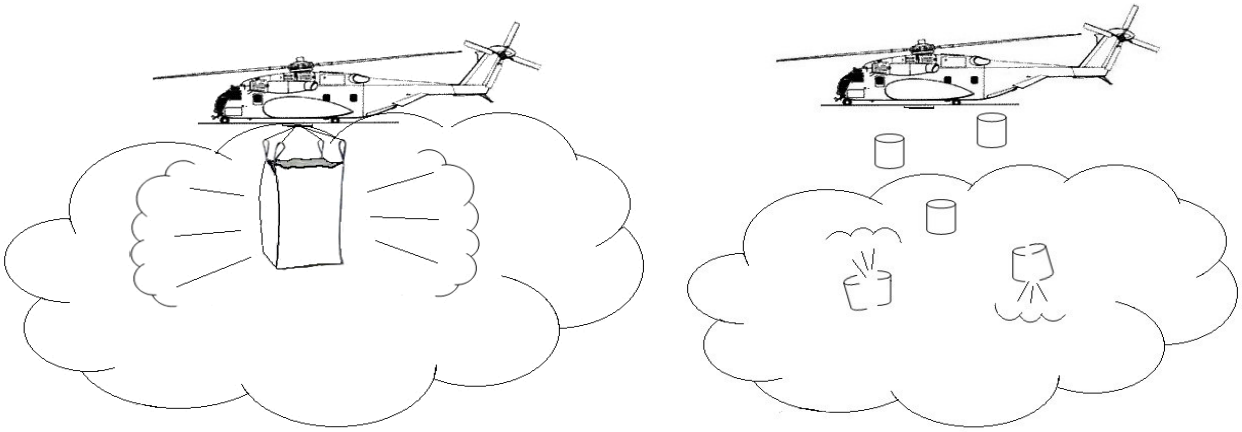
а) воздействие инфракрасным излучением с вертолета

б) воздействие инфракрасным излучением с вышек

Рис. 2. Воздействие инфракрасным излучением

2. Воздействие с помощью химических реакций, происходящих с выделением тепла.

2.1. Экзотермические реакции с образованием тепла, которые происходят при взаимодействии некоторых химических элементов с кислородом. С помощью летательного аппарата в облако поместить устройство, представляющее собой полипропиленовый пакет большого диаметра, в котором, после вскрытия герметичной упаковки, идет реакция окисления железной пыли кислородом с выделением тепла. Такое устройство способно выделять тепло в течение долгого времени, достаточного для того, чтобы нагреть холодный воздух в облаке (рис.3 а).



а) при соединении реактивов с кислородом б) при соединении реактивов с водородом

Рис. 3. Воздействие экзотермическими реакциями с образованием тепла

2.2 Экзотермические реакции, которые происходят при взаимодействии некоторых химических элементов с водородом.

– использовать небольшие резервуары со смесью (в основном, это соединения марганцовокислого калия и железного порошка или же смесь железных и медных опилок с солью). Эти резервуары выбрасываются из вертолета в воздух и, при достижении целевой зоны, с помощью пускового устройства на вертолете, взрываются, распространяя в облаке согревающую смесь (рис. 3 б).

– с помощью рассеивающего аппарата из резервуара находящегося в летательном аппарате засеивать облака аналогичной предложенной ранее смесью, взаимодействие которой с частицами воды, находящимися в переохлажденной зоне облака, приводит к выделению тепла.

Принцип вынесения предполагает отделение от объекта «мешающей» части («мешающего» свойства) или, наоборот, выделение единственно нужной части (нужного свойства). Этот принцип можно применить следующим образом: либо удалить мешающую часть – то есть то, о чем говорилось в предыдущем принципе – удалить переохлажденную часть облака, либо выделить единственно нужную часть системы – урожай. Выделить урожай – значит отделить, изолировать, закрыть его от града. Закрыть урожай от града можно следующими способами.

3. Покрытие поля различными укрывными материалами.

3.1. Использовать агроволокно, которое помимо защиты от града обладает целым рядом полезных свойств: легко выдерживает заморозок -5 градусов, защищает растения от ветра и даже снега и т.д. Однако при защите от града необходимо использовать агроволокно высокой плотности, так как агроволокно низкой плотности хотя и защищает растения от повреждений градом, но после сильного градобоя становится малопригодным

для повторного применения, так как даже небольшие дырки усиливают вентиляцию и выхолаживание.

3.2. Использовать для укрытия поля различные пористые материалы, которые будут задерживать ледяные осадки.

3.3. Использовать для укрытия поля пленки, препятствующие достижению градом поверхности поля.

Принцип проскока состоит в том, чтобы вести процесс или отдельные его этапы (например, вредные или опасные) на большой скорости. Задача состоит в том, чтобы быстро воздействовать на град, пока он не успел выпасть, либо пока не успел образоваться.

4. Использование патрульного летательного аппарата.

По локатору определить состояние градовой зоны облака и, пока эта область не перешла в критическую стадию, в воздух поднять патрульный летательный аппарат, контролирующий малейшие изменения в градовой зоне. Когда град достигнет критических размеров, из летательного аппарата моментально поступает какое-либо средство уничтожения града одним из перечисленных ранее способов.

Принцип однородности. Объекты, взаимодействующие с данным объектом, должны быть сделаны из того же материала (или близкого ему по свойствам).

5. Воздействие на охлажденные частицы влаги кипящей водой. Закрепить на летательном аппарате котел, в котором происходит кипение воды, пар выделяемый посредством которого подается в переохлажденную часть облака через выводные трубы. Кроме того к основанию котла прикрепить большую конструкцию, через которую будет происходить рассеивание кипящей воды из котла над переохлажденной частью облака, что будет способствовать повышению температуры и, соответственно, предотвратит образование града (рис. 4).

Рис. 4. Воздействие на охлажденные частицы влаги кипящей водой

Для выбора наилучшей альтернативы противоградовым ракетам использован модифицированный алгоритм Кемени – Снелла. Лучший вариант противоградовым ракетам – воздействие на облако инфракрасным излучением с вышек.

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМ ИННОВАЦИОННЫМ ПРОЕКТОМ

В.А. Петраков, О.В. Граецкая, А.С. Сомов, А.В. Петракова, А. К. Голосов

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Общепринятого определения термина «высокотехнологичный проект» сегодня не существует, хотя обычно в это понятие вкладывается смысл наукоемкости, значимости, сложности, повышенной степени риска процесса проектирования, либо самого объекта.

Высокотехнологичные проекты реализуются, как правило, в областях: аэрокосмические и ядерные технологии и объекты; оборона; медицина: научные исследования высокотехнологичного лечения, биомедицина; новые материалы; мембранные технологии; телекоммуникации, информационные технологии; материаловедение, химия и нанотехнологии; научное приборостроение и наукоемкое оборудование, робототехника; рациональное природопользование и защита окружающей среды; энергосбережение и разработка нетрадиционных источников энергии; экология и переработка отходов и ряде других. Такие проекты отличаются своей сложностью, повышенной степенью риска, непредсказуемостью результата, требующими глубокими научными проработками, особенностью жизненного цикла. Они не являются хорошо структурированными и потому принятые в зарубежье методы и методики проектирования и управления далеко не всегда могут быть использованы при создании нового высокотехнологичного продукта/ услуги. Рассмотрим основные индикаторы инновационного высокотехнологичного проекта.

Степень риска, связанного с выполняемой работой, варьируется от проекта к проекту и от категории к категории. Некоторые из основных факторов, влияющих на степень риска, приведены ниже:

– степень новизны проектов данного типа для организации;
– объем проекта;
– продолжительность и срочность исполнения. Риск повышается, если установленный срок исполнения мал и назначена фиксированная дата завершения – либо, напротив, запланированный срок настолько велик, что повышается вероятность непредсказуемых изменений политической и экономической ситуации, способной повлиять на проект;
– сложностьпроекта;
– технология: степень новизны и неопределенности технологии, применяемой в процессе разработки или производства продукта;
– изменчивость рынка;
– степень доступности дефицитных ресурсов: опытных высококвалифицированных работников и специализированных устройств.

Жизненный цикл проекта имеет определенные начальную и конечную точки, привязанные к временной шкале. Проект в своем естественном развитии проходит ряд отдельных фаз. Жизненный цикл его включает все фазы от момента инициации до момента завершения. Переходы от одного этапа к другому редко четко определены, за исключением тех случаев, когда они формально разделяются принятием предложения или получением разрешения на продолжение работы. Однако в начале концептуальной фазы часто возникают сложности с точным определением момента, когда работу уже можно идентифицировать как проект (в терминах управления проектами), особенно, если речь идет о разработке нового продукта или новой услуги. В [1] представлена модель адаптации жизненных циклов проекта к его текущему окружению. Хотя рассматриваются только случаи разработки программного обеспечения, данный вопрос может оказаться не менее важным и в отношении некоторых исследовательских проектов по разработке новых продуктов/услуг. В частности, утверждается следующее, что характеристики

организации, степень ее знакомства с используемыми технологиями, вызванный конкуренцией запуск новых проектов – это лишь некоторые из факторов окружения, варьирующиеся от одного проекта к другому. Более того, поскольку окружение может оказывать значительное влияние на проект, то особое внимание необходимо уделить выбору жизненного цикла разработки, который будет воплощен на практике. Проект должен протекать и достигать финала с учетом определенных ограничений. Классически эти ограничения определены как содержание проекта, время и его стоимость.

Разработка инновационного проекта начинается с поиска идеи. Поиск идеи для инновационного проекта может производиться: на основе последних научных разработок и исследований; анализа потребительского спроса (маркетинговых исследований, опросов потребителей). Поиск идеи для инновационного проекта - творческая задача, часто для этих целей используется ТРИЗ. Жизнеспособность идеи зависит от множества факторов: уникальность проекта, наличие конкурентов и похожих проектов; наличие научных разработок и исследований по данному проекту; наличие очевидной пользы (выгоды) для потребителя, заложенной в инновационном продукте; наличие потребности в продукте, особенности потребителя, объем рынка;соотношение затрат на реализацию проекта и коммерческого эффекта; наличие исходного капитала или возможности приобретения займа/кредита; масштабность проекта, сроки исполнения и окупаемости, необходимость дополнительных вложений; маркетинговая стратегия, варианты позиционирования продукта; уровень профессионализма и личной заинтересованности исполнителей проекта; юридическая защищенность проекта - соответствие законодательству, необходимость получения сертификатов, лицензий, наличие патентов, авторских прав, возможность получения поддержки со стороны государства (субсидий, льгот).

Инновационные проекты могут классифицироваться в зависимости от области применения на исследовательские, научно-технические и организационные. По типу инновации подразделяются на: новый товар; новая услуга; новый метод производства; новый метод управления; новый рынок; новый источник сырья. По отношению к уже имеющимся системам - инновационные проекты, предлагающие совершенно новую систему, предполагающие отказ от существующих моделей, имеющие целью завоевания существующих или абсолютно новых рынков - поддерживающие инновационные проекты, целью которых служит усовершенствование существующих систем, повышение их качества.

Особенности инновационного проекта. Первой особенностью инновационного проекта является тот факт, что он должен пройти цикл "наука-производство-потребление". Идея инновационного проекта должна иметь основу в форме научных и маркетинговых исследований, как и производство, должно подстраиваться под потребителя и опираться на научные разработки. Вторая особенность заключается в сложности прогнозирования результатов и как итог – в повышенных рисках. Появление нового связано с высоким риском непринятия обществом. Консерватизм в этом плане присущ не только большей части общества, но и большинству российских объектов производства, не способных воспринять инновации даже технически. Вероятность получения положительных результатов в зависимости от вида и характера инновационных исследований колеблется от 5 до 95%.

Разработка и внедрение инновационного проекта - творческая и уникальная задача. Поэтому многое зависит от энтузиазма и личной заинтересованности исполнителей. Анализ причин неудач инновационных проектов на западе показал, что частой причиной этих неудач является управление проектом обычными наемными менеджерами, имевших единственную мотивацию в виде денег.

И, наконец, еще одну особенность следует принять как отсутствие привычных стандартов для инновационного проекта. Даже самая четкая концепция проекта может претерпеть серьёзные изменения в процессе разработки. Кроме этого, в части организации работы участников проекта, наличие свободной воли и высокой мотивации

участников проекта делает привычную организацию труда и создание трудовой дисциплины нецелесообразной. Поэтому необходим адекватный подход к выбору руководителями стиля управления.

В теории и практике проектирования, включая управление проектом, обычно рассматривается небольшое количество подходов, методов исследования и разработки задачи [1].При реализации таких подходов к управлению проектом чаще всего рассматривается ограниченность времени для его завершения. Ограниченность стоимости определяется бюджетом, выделенным для осуществления проекта. Ограниченность содержания определяется набором действий, необходимых для достижения конечного результата. Эти три ограниченности часто соперничают между собой. При таком подходе обычно применяются при разработке алгоритма проектирования и управления методы, зарекомендовавшие себя при управлении хорошо структурированными проектами. Ресурсами же управления в этом случае рассматривается набор действий для достижения конечного результата.

Назначение, содержание, характеристики и особенности высокотехнологичного инновационного проекта не укладываются в ранее определенные подходы к процессу проектирования, формированию его ресурса, в том числе профессиональных компетенций исполнителей на основе адаптации их состава и свойств к востребованным обществом характеристикам объекта проектирования. Такой подход должен заключаться в системном синтезе характеристик проекта и ресурса управления им, направленных на формирование конкурентных характеристик высокотехнологичного продукта/услуги. Это позволит исследовать структуру управления проектом как социотехническую систему и, как следствие, применять при ее проектировании современные методы системного синтеза, в том числе, синтез профессиональных компетенций исполнителей. Таким образом, социотехническая система становится высокотехнологичным продуктом, при проектировании которого могут быть использованы методы технико-технологического и научно-образовательного форсайта, а следовательно и разработка дорожной карты на его создание. Такой подход к управлению проектом является, на наш взгляд, новым и позволяет находить эффективные решения в системной разработке характеристик самого продукта и соответствующих профессиональных компетенций исполнителей, необходимых для его разработки. При таком подходе обозначаются новые важные процедуры, не свойственные (или неприменяемые) известными методами управления проектом, а именно: оценка и формализация критериев проектирования и установление их связи с переменными состояния (ресурсом); разработка комплексов математических моделей, алгоритмов и программ, определяющих взаимодействие процесса проектирования и характеристик его продукта; решение оптимизационных динамических задач, результатом которых является нахождение закона изменения ресурса управления во времени, реализующего эффективное решение многокритериальной задачи оптимизации; синтез необходимых профессиональных компетенций исполнителей; разработка методов системного синтеза эффективных проектных решений на основе моделей социотехнических систем [2].

Список литературы

1. Рассел Д. Арчибальд Управление высокотехнологичными программами и проектами. Изд. Третье, переработанное и дополненное. М., 2004.-431с.

2. Оптимизация управления в социотехнической системе/ В.А. Петраков [и др.]// Изв. ВУЗов Сев.Кавк. регион. Техн. науки. 2012. №2. С.8-10.

СМЕШАННЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКТОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Е.В. Корохова, Е.Н. Бородулина, С.А. Гудкова

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Химические источники тока, используемые в оборонной промышленности и космической отрасли, являются многокомпонентными изделиями и должны удовлетворять высоким требованиям к качеству, включая ряд физико-химических характеристик, массу и геометрические размеры. Обеспечение требуемых значений указанных параметров в условиях мелкосерийного и штучного производства осуществляется путем контроля и отбраковки на всех этапах жизненного цикла изделия, строго выполнения технологической инструкции на этапах подготовки компонентов, комплектации и сборки батарей. Одним из путей снижения себестоимости продукции и повышения качества изделий является совершенствование процесса комплектования. Необходимо выбрать метод сборки, учитывая следующие критерии: экономические затраты, сложность, трудоемкость процесса, невозможность усложнения конструкции, степень взаимозаменяемости сборочной единицы, их количество и опыт использования; а также разработать алгоритм его реализации с учетом особенностей производства химических источников тока.

Проведен анализ следующих методов сборки: неполной взаимозаменяемости, или теоретико-вероятностной сборки; сборки с пригонкой; компенсационных звеньев; компенсационных материалов; групповой взаимозаменяемости или селективной сборки; выбран метод селективной сборки.

Реализация метода групповой взаимозаменяемости представляет собой технологический цикл, включающий измерение параметров, использующихся при сопряжении деталей и их анализ, разбиение деталей на группы в соответствие с установленной их градацией, иногда выбор частного способа сборки для разных групп деталей, комплектование деталей, оценка качества произведенного изделия, контроль и управление селективной сборкой, как отдельный, параллельный цикл, присутствующий на протяжении всего сборочного процесса. Каждый шаг может обеспечиваться различными способами и алгоритмами. На основе данной модели возможно решение задачи оптимального комплектования с наименьшими затратами при высоком качестве изделия, удовлетворяющем требованиям клиента, стандартам и внутренним нормам предприятия.

Введем ряд обозначений. Элементы – первичные источники тока, из которых формируются блоки. Целью процесса комплектования является получение максимального числа блоков (по два рядя элементов) при выполнении ограничений на массу и геометрические размеры $M/(n*m) \rightarrow max$, где M – количество элементов во всей партии, m – число элементов в ряду; n – число рядов.

Существует две задачи: первая - нахождение такой комбинации сопрягаемых элементов, в которой масса необходимого количества блоков будет минимальна, при этом сумма допусков диаметров элементов, входящих в ряд, не будет превышать заданного значения; вторая - сформированные блоки должны иметь одинаковую массу, допуски на длину блоков не должны превышать заданный суммарный допуск. Решение задачи будет находиться на основе смешанного алгоритма с учетом групповой взаимозаменяемости элементов в несколько этапов:

- определение целевой функции и ограничений в зависимости от двух вариантов;
- формирование начального не худшего решения;
- реализация смешанного метода;
- получение оптимального решения - искомой комбинации элементов.

Смешанный алгоритм разработан с использованием генетического и эволюционного подходов.

Этап 1. Определение целевой функции и ограничений. Блок состоит из m – элементов в ряду и n рядов, элементы комплектуются по двум параметрам: диаметру и массе (рис. 1). Тогда:

- диаметр сопрягаемого элемента N (m, n) - d_{mn};
- номинальное значение диаметра элемента N (m, n) - d_{mn}^{nom};
- максимальное значение диаметра элемента N (m, n) - d_{nm}^{max};
- минимальное значение диаметра элемента N (m, n) - d_{mn}^{min};
- поле допуска по диаметру элемента N (m, n) - $\Delta_{mn}^{d} = d_{mn}^{max} - d_{mn}^{min}$;
- масса сопрягаемого элемента N (m, n) - m_{mn};
- номинальное значение массы для элемента N (m, n) - d_{mn}^{nom};
- максимальное значение массы элемента N (m, n) - m_{mn}^{max};
- минимальное значение массы элемента N (m, n) - m_{mn}^{min};
- поле допуска по массе элемента N (m, n) - $\Delta_{mn}^{m} = m_{mn}^{max} - m_{mn}^{min}$.

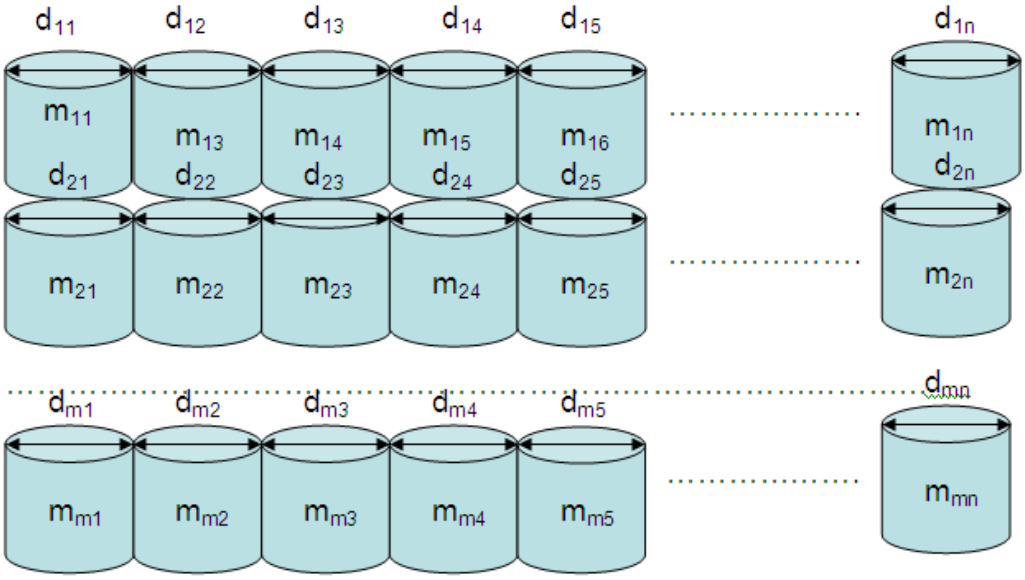


Рис. 1 - Блок, состоящий из n*m компонентов

В таком случае, целевая функция, оценивающая качество решения, зависящего от соответствия параметров d и m изделия установленным ограничениям, и влияющим на количество собранных блоков, - $F(d_{mn}, m_{mn}) = M/(n*m) \rightarrow max$.

Поскольку заказчик может предъявлять одно из двух требования, то и связанные с этим ограничения будут иметь свои особенности. В случае, когда заказчику важно, чтобы масса блока была минимальна, ограничения будут иметь вид:

- поскольку масса блока находится в пределах $M_{m*n}^{min} \leq M_{m*n} \leq M_{m*n}^{max}$, где m*n – размерность блока и минимальность массы блока обеспечит ограничение $M_{m*n} \rightarrow min$.
- аналогично длина ряда в блоке $L_n^{min} \leq L_n \leq L_n^{max}$, ограничение $L_n \leq 1$ должно выполняться для каждого из n рядов.

В случае, когда необходимо получить блоки одинаковой массы, ограничения будут иметь иной вид:

- масса всего блока должна быть величиной постоянной M_n =const;
- ограничение по длине ряда $L_n \leq 1$ должно выполняться для каждого из n рядов.

Этап 2. Формирование начального решения. Значения сопрягаемых параметров d_{mn} и m_{mn}являются очевидно случайными величинами, распределенными по определенному закону (часто приближаемому к нормальному) и дальнейшее разбиение деталей на группы в соответствие с полями допуска, часто производится произвольным образом, особенно в случаях, когда алгоритм нахождения решения относится к классу точных.

Поскольку используется смешанный алгоритм являющийся приближенным методом, поэтому для улучшения качества поиска решения необходимо предварительно

ранжировать совокупность элементов и только после этого формировать начальные особи [1].

Можно предположить, что значения диаметра соответствует качественным оценкам (подобно шкале Харрингтона, но в данном 0 – плохо, 1 – хорошо). В таком случае лучшее значение оценки элемента будет стремиться к максимуму.

Оценку необходимо проводить по безразмерной величине, поскольку кроме диаметра следует еще оценивать другой параметр – массу:

- определяется d_{mn}– минимальное значение диаметра во всей партии;

- рассчитывается $\min(d_{mn})/d = P(d_{mn})$– безразмерная оценка по диаметру, при чем, чем меньше значение d, тем больше значение $P(d_{mn})$, тогда для лучшего значения $P(d_{mn})$->max.

Для второго требования такая оценка тоже пригодна, поскольку, комплектуя элементы только из разных градационных групп, можно получить блоки одинаковой массы. Этапы расчетов те же, что и в первом случае: определяется $\min(m_{mn})$– минимальное значение массs всей партии, рассчитывается $\min(m_{mn})/m = P(m_{mn})$– безразмерная оценка по диаметру, при чем, чем меньше значение m, тем больше значение $P(m_{mn})$, тогда для лучшего значения $P(m_{mn})$->max.

Далее составляется матрица, изображенной ниже, элементы ранжируются по методу скаляризации векторных величин, в зависимости от комплексной оценки, значение которой чем меньше, тем лучше альтернатива.

Далее происходит разбиение партии на m частей, соответственно n элементов в части – на градационные группы.

Затем необходимо задать первоначальную комбинацию элементов, транспонировав каждую часть и объединив в блок. Комбинационный принцип заключается в том, что в один ряд должны попадать не только наилучшие элементы, с каждым разом приводя к ухудшению качества, но и с более низким качеством, в совокупности, удовлетворяющим ограничениям. В лучшем случае, такая операция позволит найти первый элемент в каждом ряду и, соответственно, исключить в дальнейшей операции одноточечного кроссинговера $n!(n*m)/M$ перестановок.

Таким образом, положение элементов будет иметь вид, изображенный на рис. 3, что можно считать результатом предварительного этапа селекции.

Этап 3. Реализация смешанного алгоритма для нахождения оптимального решения. Зная целевую функцию и имея первоначальное решение, необходимо найти оптимальную комбинацию элементов в блоке с учетом ограничений.

Итак, предварительным этапом является расчет целевой функции $F(d_{mn}, m_{mn}) = M_{m*n}/(n*m)$ для начального положения элементов при ограничениях:

- $M_{m*n} \rightarrow \min$ и $L_n \leq 1$ (первая группа ограничений);

- $M_n = const$ и $L_n \leq 1$ (вторая группа ограничений).

Далее происходит оценка решения для выявления хромосом, которые подлежат замене в связи со своей непригодностью:

- из всей совокупности выделяются гены, которых суммарная оценка P(d) и P (m) - $P_g^{(2)}$ - превышает среднее значение, они образуют множество G (g, K), где g – количество генов и K – количество хромосом в гене;

- определяются гены, для которых суммарная оценка $P(d_{mn})$ и $P(m_{mn})$- $P_z^{(1)}$ - ниже среднего значения, они образуют совокупность Z (z, K), где z – количество генов, удовлетворяющих данному условию и K – количество хромосом в гене.

Затем формируется двудольный граф. Ранжирование генов в обеих совокупностях происходит по значениям $P_z^{(1)}$ и $P_g^{(2)}$, как показано на рисунке, где $P_z^{(1)}$ и $P_g^{(2)}$ – максимальные значения, соответствующие минимальному рангу, для генов с минимальными значениями $P_z^{(1)}$ и $P_g^{(2)}$ поиск и замену хромосом производить легче, а в случаях, когда высокая точность не столь важна, оперированием над ними можно пренебречь.

Оценка решения происходит по следующему принципу: если величина $P_g^{(2)}$ уменьшилась, а $P_z^{(1)}$ увеличилась относительно предыдущего решения, то предложенное решение приблизилось к оптимальному и его можно считать базовым на данном этапе;

- скрещивание хромосом в одной итерации проводиться у генов, для которых выполняется условие $P_g^{(2)} \leq | P_z^{(1)}|$ в соответствие с рангом до тех пор, пока $P_g^{(2)} \leq 0$, $P_z^{(1)} \leq 0$ [2];

- селекция генов происходит в соответствие с правилом частичной замены популяции, то есть происходит проверка вторых ограничений задачи и значений целевой функции F (d_{mn}, m_{mn}) [2]:

1) находится значения F (d_{mn}, m_{mn}) при котором удовлетворяются ограничения;

2) определяется, в каком случае полученное решение лучше решения, найденного по методу условной оптимизации (в случае, когда необходимо добиться высокой точности главными критериями выступают указные два ограничения является, в остальных F (d_{mn}, m_{mn}) → max). Лучшее решение становится базовым – эталонным, с ним сравниваются решения с частичной заменой;

- в первую очередь в базовом решении заменяются хромосомы с минимальным рангом;

- определяется лучшее решение в соответствие с вышеуказанным методом, если новое решение оказывается лучшим, то оно становиться базовым, затем переходят к генам следующего ранга, и так до тех пор, пока не будут проверены гены всех рангов и сформирована лучшая в данной итерации комбинация хромосом.

Конечный результат будет получен в случае:

- когда возможных генов для скрещивания не будет найдено;

- когда комбинация, состоящая из родительских генов, окажется лучше новой комбинации и всех модифицированных совокупностей.

Таким образом, представленное решение задачи оптимального комплектования химических элементов, производимое методом селективной сборки на основе смешанного алгоритма, обеспечивает удовлетворение требованиям высокого качества изделия, в то же время сокращая затраты на производство путем уменьшения незаконченного производства и неиспользованных деталей.

Список литературы

1. Батищев Д. И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач. Учебное пособие под ред. Я. Е. Львовича:Воронеж, 1995 – 348.

2. Тененев, В. А. Применение генетических алгоритмов с вещественным кроссовером для минимизации функций большой размерности//Интеллектуальные системы в производстве. -2006. -№ 1 (7). –с. 93-107.

Научное издание

Сборник тезисов

VIII Всероссийской

научно-технической конференции

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Подписано в печать 04.09.2012 г. Заказ № 2483.
Тираж 50 экз. Формат 60*84 1/ 16. Печ. лист 6,74. Уч.изд.л 6,5.

Издательство Южного федерального университета
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.

Типография Южного федерального университета
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.